

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université de Saad Dahleb Blida

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

ALOUACHE ABDENOUR

pour l'obtention du diplôme Master 2 en Électronique option Robotique

Thème

Elaboration d'une chaine de mesure par le bruit de Barkhausen, optimisation d'un programme d'acquisition et de traitement

Proposé par : Mr ZERGOUG MOURAD & Mr BENCHERCHALI MOHAMED AMINE

Année Universitaire 2013-2014

Remerciements

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à dieu, toute la grâce pour m'avoir guidé et honoré par la lumière de la compréhension et de m'avoir accordé la connaissance de la science.

*Je remercie mon encadreur **Mr. ZERGOUG** directeur de division des procédés électrique et magnétique « DPEM » du centre de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle de chèreaga « CSC » qui ma proposé ce sujet et qui a patiemment suivi mon travail et qui a prodigué ses précieux et minutieux conseils.*

*Je tiens aussi à remercier mon Co-promoteur **Mr. BENCHERCHALI** chargé de cours à l'université de Blida pour leurs encouragements et ses conseils fructueux, aussi pour la documentation qu'il a bien mettre à ma disposition.*

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury en acceptant d'évaluer ce modeste travail.

*J'adresse toute ma gratitude à tous mes amis et collègues pour leurs soutiens et encouragement : **Sihem, Yasmina, Amina, Abdelaziz, Slimane, Mohamed.***

Je ne peux pas terminer ce préambule sans remercier ma famille pour leur présence continue tout au long de ce travail.

Merci surtout à ma femme pour son soutien inconditionnel et sa compréhension.

ملخص:

العمل المقدم في هذه المذكرة يدخل في إطار مشروع بحث في طرق المراقبة الغير متلفة و يهدف إلى صناعة جهاز يقوم على استغلال صليل BARKHAUSEN من أجل تصنيف و الكشف عن عيوب المعادن القابلة للتمغنت, و كذا رسم حلقة التباطؤ (l'hystérésis) لتعيين الخصائص المغناطيسية لهذه المعادن قصد تصنيفها.

كلمات المفاتيح: صليل Barkhausen; حلقة التباطؤ (l'hystérésis).

Résumé :

Ce mémoire, rentre dans le cadre d'un projet de recherche en Contrôle Non Destructif, ayant pour but la réalisation d'un système de caractérisation et de détection des défauts des matériaux ferromagnétiques par la technique du bruit de barkhausen et le tracé du cycle d'hystérésis.

Pour cela un dispositif a été réalisé et plusieurs algorithmes ont été développé à fin de faciliter l'interprétation du signal et donc analyser le matériau.

Mots clés : bruit barkhausen; cycle d'hystérésis.

Abstract :

In our research project, we have used the barkhausen noise and hysteresis loop in order to identify defect in metal piece.

For that, a measuring equipment was produced and several algorithm were developed with an aim of facilitating interpretation of the signal and thus of analysis of material.

Keywords: Barkhausen noise; hysteresis loop.

Listes des acronymes et abréviations

CND : Contrôle non destructif.

BN : Bruit de Barkhausen.

DSP. Densité spectrale.

FFT : transformé de fourrier rapide.

Hc : champ coercitif.

Br : induction rémanente.

Bs : induction de saturation.

TH: Transformation de Hilbert.

T- F : La transformation temps- fréquence.

χ_T , $(\partial M / \partial H)$: La susceptibilité magnétique.

RMS : root mean square.

Φ : Le flux magnétique.

N: Nombre de spire de la bobine.

S: La section du circuit magnétique.

μ : La perméabilité magnétique.

F : La force portante d'un électroaimant.

$e(t)$: La tension aux bornes de capteur.

L : L'inductance de la bobine.

R : Resistance.

f : La fréquence.

C : La capacité.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Généralités sur le magnétisme	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Magnétisme en l'absence d'excitation	3
1.2.1 Magnétisme à l'échelle atomique :	3
1.3 Classification des matériaux du point de vue magnétique.....	4
1.3.1 Diamagnétisme :	4
1.3.2 Paramagnétisme :	5
1.3.3 Ferromagnétisme :	6
1.4 Théorie des domaines magnétiques	6
1.4.1 L'énergie d'échange :	8
1.4.2 L'énergie d'anisotropie cristalline :	8
1.4.3 L'énergie magnéto élastique :	8
1.4.4 L'énergie magnétostatique :	9
1.5 Discontinuités du processus d'aimantation.....	9
1.6 Conclusion	11
Chapitre 2 Approches générales sur le bruit de Barkhausen et le cycle d'hystérésis	12
2.1 Introduction.....	12
2.2 historique	12
2.3 Polarisation et classification des matériaux ferromagnétiques.....	13
2.3.1 Processus de polarisation :	13
a. Courbe de première aimantation.....	13
b. Cycle d'hystérésis	15
2.3.2 Classification des matériaux ferromagnétiques suivant le cycle d'hystérésis : ..	16
2.4 Bruit BARKHAUSEN	17
2.4.1 Expérience de Barkhausen :	17
2.4.2 Discontinuité du processus d'aimantation:.....	18
2.4.3 Mesure de Bruit de BARKHAUSEN :	19
2.4.4 Applications de l'effet Barkhausen au suivi des évolutions microstructurales:.....	19

a.	Influence de la microstructure	19
b.	Influence de La taille des grains	20
c.	Influence des precipitations.....	21
d.	Influences de d'état de contrainte	21
2.5	Conclusion	22
Chapitre 3 La chaine de mesure		23
3.1	Introduction.....	23
3.2	Position du problème	23
3.3	Formulation synoptique.....	25
3.4	Dispositif d'excitation magnétique.....	27
3.4.1	Générateur d'onde triangulaire :	28
3.4.2	L'amplificateur de puissance :	29
3.4.3	Etage circuits magnétiques :	31
a.	Le flux magnétique	31
b.	La force magnétomotrice f.....	32
c.	La reluctance d'un circuit magnétique homogène.....	32
d.	La formule d'hopkinson	32
e.	La force d'attraction ou portante F d'un électroaimant	33
3.5	Conception et caractérisation des capteurs	33
3.5.1	Capteur en acier doux :	33
3.5.2	Capteur en ferrite :	34
3.6	Dispositif d'acquisition et du traitement des signaux.....	35
3.6.1	Etage de pré amplification :	35
3.6.2	Etage d'amplification et filtrage :	37
3.6.3	Trace du cycle d'hystérésis:.....	38
a.	Capture du champ magnétique H	38
b.	Capture du champ d'induction magnétique B	38
3.7	Cage de Faraday	39
3.8	Conclusion	40
Chapitre 4 Applications et traitement numérique		41

4.1	Introduction.....	41
4.2	Schéma synoptique.....	41
4.3	Etude expérimentale	43
4.3.1	La cémentation :	43
4.3.2	Préparation des échantillons :	44
4.3.3	Caractéristiques de pièces possédantes des défauts :	45
4.4	Traitement numérique du signal	47
4.4.1	Acquisition des signaux :	47
4.4.2	Echantillonnage :	48
4.4.3	Transformée de Fourier :	48
4.4.4	Transformation de Hilbert (TH) :	48
a.	Definition	48
b.	Utilisation de la transformée de Hilbert dans la détection d'enveloppe	49
4.4.5	Fenêtres temporelles :	50
4.4.6	La représentation temps –fréquence :	50
4.5	L'interface graphique	50
4.6	Résultats expérimentaux	51
4.7	Analyse et interprétation des résultats	60
4.7.1	Analyse par enveloppe :	60
4.7.2	Analyse par FFT et la DSP :	61
4.7.3	Analyse par transformation temps- fréquence :	62
4.7.4	Analyse par Cycle d'hystérésis :	62
4.8	Conclusion	63
	Annexes	66
	Bibliographie	74

Liste des figures

Figure 1. Représentation du moment magnétique élémentaire au niveau atomique. _____	4
Figure 2. Variation de l'induction en fonction du champ magnétique. _____	6
Figure 3. Représentation schématique de la microstructure magnétique d'un cristal. _____	7
Figure 4. Représentation schématique selon le modèle à quatre domaines. _____	7
Figure 5. Discontinuité de processus d'aimantation. _____	10
Figure 6. Schéma représentatif des propriétés ferromagnétiques à différentes échelles. ____	11
Figure 7. Décomposition de la courbe de première aimantation. _____	13
Figure 8. Courbe de première aimantation. _____	14
Figure 9. Cycle d'hystérésis et évolution de la micro structure magnétique. _____	15
Figure 10. Cycle d'hystérésis pour les deux types de matériaux magnétiques. _____	17
Figure 11. Expérience de Barkhausen. _____	18
Figure 12. Exemple de Bruit BARKHAUSEN Brut et RMS. _____	19
Figure 13. Signaux BARKHAUSEN et analyse fréquentielle pour différents états métallurgiques. _____	20
Figure 14. Explication qualitative de la sensibilité à la contrainte. _____	21
Figure 15. Structure générale d'une chaîne de mesure. _____	25
Figure 16. Schéma synoptique complet de l'appareil de BARKHAUSEN. _____	26
Figure 17. Schéma de principe de l'appareillage BARKHAUSEN. _____	27
Figure 18. Dispositif d'excitation magnétique. _____	28
Figure 19. Schéma de principe du générateur. _____	29
Figure 20. Schéma de principe de l'amplificateur de puissance. _____	30
Figure 21. Montage équivalent et la fonction de transfert. _____	30
Figure 22. Le circuit magnétique pour saturation des pièces. _____	31
Figure 23. Capteur en acier doux. _____	33
Figure 24. Capteur en ferrite. _____	34
Figure 25. Dispositif d'acquisition et du traitement des signaux. _____	35

Figure 26. Préamplificateur à deux étages .	36
Figure 27. Filtre passe haut .	37
Figure 28. Capteur du champ d'excitation (H).	38
Figure 29. Schéma de principe de l'intégrateur.	39
Figure 30. Systeme de mesure du bruit barkhausen.	42
Figure 31. Représentation schématique des traitements effectués.	43
Figure 32. Schéma Pièces cimentées.	44
Figure 33. Schéma de la « Pièce05 ».	45
Figure 34. Schéma de la « Pièce06 ».	46
Figure 35. Schéma de la « Pièce0 7 ».	46
Figure 36. Schéma de la « Pièce08 ».	47
Figure 37. Transformée de Hilbert du signal $x(t)$.	49
Figure 38. L'interface de simulation et traitement.	51
Figure 39. Résultats « pièce 01 »obtenus par les différents traitements.	52
Figure 40. Résultats « pièce 02 »obtenus par les différents traitements.	53
Figure 41. Résultats « pièce 03 »obtenus par les différents traitements.	54
Figure 42. Résultats « pièce 04 »obtenus par les différents traitements.	55
Figure 43. Résultats « pièce 05 »obtenus par les différents traitements.	56
Figure 44. Résultats « pièce 06 »obtenus par les différents traitements.	57
Figure 45. Résultats « pièce 07 »obtenus par les différents traitements.	58
Figure 46. Résultats « pièce 08 »obtenus par les différents traitements.	59
Figure 47. Effet de la cémentation sur enveloppe	61
Figure 48. Effet de défaut sur enveloppe	61
Figure 49. Effet cémentation sur le PIC FFT.	61
Figure 50. Effet défaut sur le PIC FFT.	61
Figure 51. Effet de cémentation sur le cycle.	63
Figure 52. Effet de défaut sur le cycle.	63

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristique du capteur utilisé	34
Tableau 2. Caractéristique des pièces cimentées.....	45

Introduction générale

Les techniques avancées dans le traitement numérique des méthodes de contrôle non destructif ont permis à la caractérisation de prendre une place importante, dans les différents secteurs industriels.

Le traitement numérique joue un rôle important dans le cadre de la mise au point des méthodes de CND, de leur qualification ou encore, pour contribuer à l'expertise des résultats d'inspections

La formulation des équations à la base des différents modèles proposés repose sur des méthodes semi-analytiques. Cette approche permet de résoudre une grande variété de configurations dans des temps de calcul très courts en comparaison de méthode purement numériques (Eléments Finis...).

L'étude du bruit Barkhausen et cycle d'hystérésis devient de plus en plus importante aussi bien sur le plan recherche fondamentale que sur le plan recherche appliqué. Cette étude a pour objectif de faire le point sur une méthode qui fait encore ses preuves; pour certains secteurs industriels, utiliser la méthode de Barkhausen est déjà de la routine au niveau laboratoire, d'autres s'interrogent, qu'ils trouvent ici les éléments permettant de se forger une opinion, car nul ne peut ignorer aujourd'hui ce qu'est le bruit Barkhausen ou le cycle d'hystérésis et ce qu'ils permettent de faire dans le contrôle non destructif. Les applications de cette technique restent trop souvent au stade du laboratoire. Le développement des travaux de recherche est un réel tremplin pour que cette technique s'affirme dans le monde industriel. A l'heure actuelle, même si ce phénomène n'est pas encore bien interprété par les lois physiques, ceci n'empêche pas une large utilisation de la technique.

Le système de contrôle par Bruit de Barkhausen et cycle d'hystérésis à été très développé ces dernières années par le perfectionnement de la technologie apporté aux appareils de mesures. Le micro-ordinateur a énormément contribué au

développement de la physique des BN et cycle d'hystérésis. Il offre la possibilité de résoudre les problèmes de caractérisation des matériaux, d'approfondir les recherches à l'échelle microscopique. Le développement important de l'informatique et le progrès dans leur capacité, ont influencé le travail de recherche relatif au contrôle par cette méthode et contribue à leur application industrielle

L'approche expérimentale exploite l'outil informatique pour simplifier les chaînes de contrôles par une automatisation de ces systèmes assez complexes et une facilité d'interprétation des résultats.

Ce mémoire sera divisé en quatre chapitres :

- Chapitre 1 : Description des phénomènes physiques, qui sont en relation avec cette étude.
- Chapitre 2 : Approches générale sur le phénomène du bruit de Barkhausen et cycle d'hystérésis.
- Chapitre 3 : Calcule des paramètres de chaque étage de système ainsi que sa réalisation.
- Chapitre 4 : Caractérisation des pièces ferromagnétiques préparées (échantillons) par BN et cycle d'hystérésis, en utilisant le système réalisé.

Chapitre 1 Généralités sur le magnétisme

1.1 INTRODUCTION

Le magnétisme est une branche de la physique qui étudie les corps aimantés, la plupart des matériaux subissent une aimantation temporaire sous l'action d'un champ magnétique extérieur. Celui-ci s'exerce sur les particules chargées en mouvement qui constituent les atomes du matériau.

Certaines substances sont douées au contraire d'une forte aimantation permanente comme la magnétite.

1.2 MAGNETISME EN L'ABSENCE D'EXCITATION

Pour comprendre et interpréter l'évolution de la structure magnétique d'un matériau, il est nécessaire de remonter à l'échelle atomique, puis progressivement de passer à l'échelle de l'arrangement d'atomes puis du cristal et enfin de la pièce. Notre étude portant sur des alliages ferreux (fer doux et acier), nous ne rappelons que le cas du ferromagnétisme.

1.2.1 Magnétisme à l'échelle atomique :

Toute substance matérielle est formée d'un ensemble d'atomes. Chaque atome est composé d'un noyau autour duquel gravite un certain nombre d'électrons. Les particules constituant le noyau et les électrons sont chargées et perpétuellement en mouvement, ce qui crée des moments magnétiques qui sont à l'origine des propriétés magnétiques des corps.

Le moment magnétique électronique provient d'une part des mouvements des électrons autour du noyau sur leurs orbites et d'autre part de la rotation spinale de chaque électron.

Le moment magnétique dû aux mouvements des composants du noyau est beaucoup plus faible. Chaque atome possède donc un moment magnétique élémentaire dont la

direction et le module dépendent de l'environnement particulier de l'atome (nature et position, ...) [1].

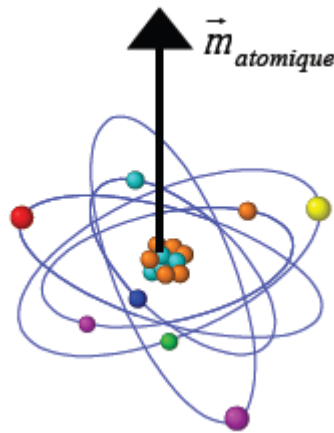


Figure 1. Représentation du moment magnétique élémentaire au niveau atomique [1].

Du point de vue magnétique, chaque atome peut être considéré comme un petit aimant élémentaire. Pour le fer, il se trouve que ce moment magnétique élémentaire est particulièrement important.

1.3 CLASSIFICATION DES MATERIAUX DU POINT DE VUE MAGNETIQUE

Les matériaux magnétiques sont des matériaux qui ont la propriété de présenter un moment d'aimantation sous l'influence d'un champ magnétique d'excitation extérieur.

On distingue entre les éléments présentant des couches externes électroniques incomplètes.

La susceptibilité magnétique $\chi_T = (\partial M / \partial H)$, exprime la réponse d'un milieu sous l'action d'un champ extérieur \vec{H} . La mesure de la susceptibilité permet de déterminer le type du matériau [2].

1.3.1 Diamagnétisme :

Ce type de magnétisme est caractérisé par une susceptibilité négative de faible amplitude. Le diamagnétisme est dû à un mouvement orbital des électrons, provoqué

par le champ magnétique appliqué. Ce mouvement peut être assimilé à un courant microscopique dont le comportement serait comparable à celui induit dans un solénoïde. En vertu de la loi de Lenz, le courant induit s'oppose au champ qui le produit, ce qui est en accord avec le fait que χ_r est négatif, le cas des gaz rares, certains métaux et un nombre de composés organiques.

Le diamagnétisme provient de la tendance des charges électriques, quels que soient leurs signes à protéger partiellement l'intérieur de l'élément qu'elles entourent (effet écran), tout se passe comme si sous l'influence de ce champ, les charges créaient un champ magnétique induit qui s'oppose au champ appliqué H . La susceptibilité est dans ce cas très faible, négative et indépendante de la température. Ce phénomène apparaît dans tous les matériaux.

1.3.2 Paramagnétisme :

On appelle paramagnétisme l'ensemble des propriétés magnétiques de certaines substances dont les atomes (ions) possédant un moment magnétique constant indépendant du champ magnétique extérieur, caractérisé par une susceptibilité relative positive, de faible amplitude. On les rencontre dans les substances dont les atomes possèdent un moment magnétique permanent, lorsque ces moments ne sont pas couplés les uns aux autres.

C'est un magnétisme non coopératif, il ne fait pas appel aux interactions d'échanges, les matériaux qui relèvent de ce modèle n'ont pas d'aimantation spontanée, l'orientation des moments magnétiques est aléatoire ce qui donne un moment résultant nul.

Sous un champ magnétique extérieur, les corps paramagnétiques possèdent une aimantation non nulle, la susceptibilité est positive et inversement proportionnelle à la température absolue.

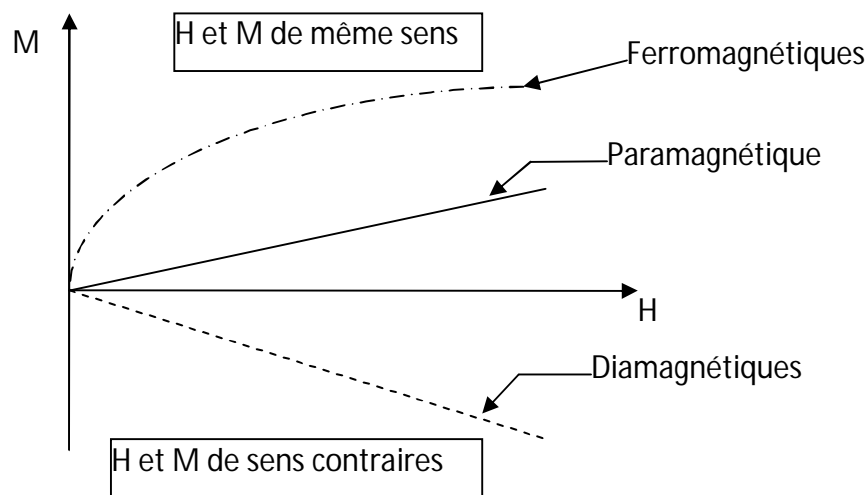


Figure 2. Variation de l'induction en fonction du champ magnétique [2].

1.3.3 Ferromagnétisme :

Ce type de magnétisme est caractérisé par une susceptibilité positive avec une amplitude importante. Un matériau Ferromagnétique peut faire apparaître une induction très importante pour des faibles valeurs du champ d'excitation extérieur. Un corps ferromagnétique a un moment magnétique spontané à l'échelle microscopique, les spins électroniques sont arrangés de façons régulières. Le ferromagnétisme est dû à l'existence d'interactions internes entre les moments magnétiques qui tendent à aligner les spins. On observe en effet que les moments atomiques sont bien alignés dans des zones appelées domaines magnétiques de Weiss [3].

1.4 THEORIE DES DOMAINES MAGNETIQUES

Un matériau ferromagnétique est caractérisé par l'existence des domaines élémentaires appelés **domaines de WEISS** au sein desquels l'aimantation est orientée selon l'une ou l'autre des directions de facile aimantation, les moments magnétiques des domaines adjacents peuvent être orientés à 180° ou à 90° l'un de l'autre.

Ces domaines sont séparés par des parois appelées **parois de BLOCH**. Quand les directions de magnétisation des domaines contigus sont antiparallèles, on dit que la paroi est à 180° quand les directions globales de ces domaines gouvernés par la minimisation de l'énergie du système est appelée microstructure magnétique [3].

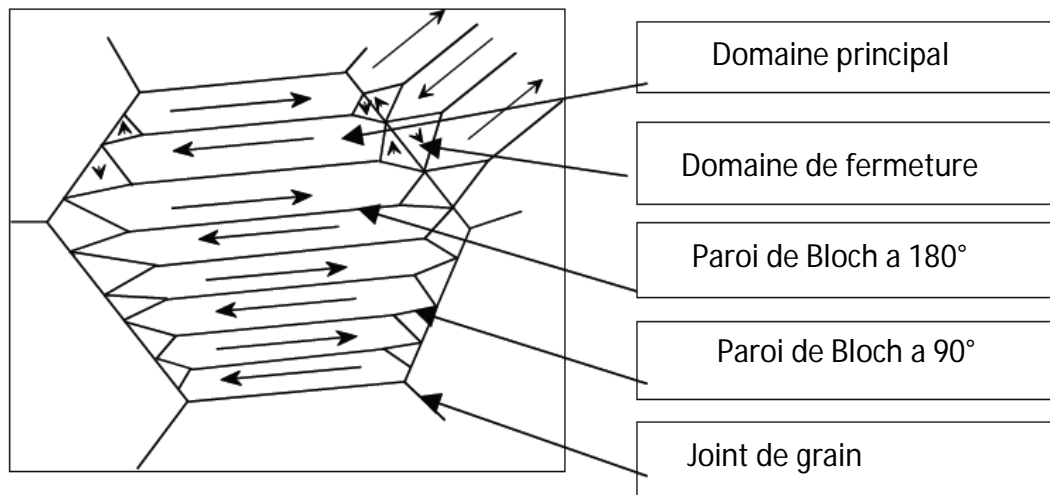


Figure 3. Représentation schématique de la microstructure magnétique d'un cristal [3].

Les structures de domaine sont souvent bien plus compliquées, mais le modèle à quatre domaines permet de décrire un cristal de matériau ferromagnétique désaimanté, il est très utilisé pour expliquer de manière qualitative les phénomènes de magnétisation à l'échelle microscopique.

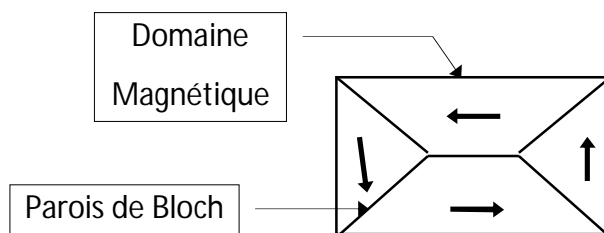


Figure 4. Représentation schématique selon le modèle à quatre domaines [3].

L'organisation des atomes pour un matériau ferromagnétique obéit au principe général suivant : « Tout système physique se place, s'il est permis, dans un état correspondant à une énergie minimale » [3].

L'organisation d'un matériau ferromagnétique monocristallin se constitue en domaines qui correspondent à la minimisation des énergies suivantes :

1.4.1 L'énergie d'échange :

Energie du type microscopique, qui résulte de la mise en commun partielle des trajectoires d'un électron périphérique entre deux atomes voisins. La valeur de cette énergie est égale à l'énergie qu'il faudrait fournir pour rompre cette situation, cette énergie d'échange a tendance à aligner les moments magnétiques microscopiques de chaque atome.

1.4.2 L'énergie d'anisotropie cristalline :

A l'état solide le fer, le cobalt et le nickel (qui sont les principaux éléments de matériaux magnétiques doux) cristallisent respectivement dans les systèmes : cubique centré, hexagonal et cubique à faces centrées.

Prenons le cas d'un matériau qui cristalliserait selon le système cubique centré.

Comme on vient de le voir précédemment les moments magnétiques microscopiques ont tendance à s'aligner, en raison de l'énergie d'échange qui règne entre les différents atomes, ainsi :

La distance entre deux atomes voisins dépend de leur position relative dans le réseau cristallin. L'énergie d'échange sera donc fonction de la direction. Ainsi, il existera des directions d'orientations privilégiées de ces moments. L'énergie d'anisotropie représente l'énergie à fournir pour faire tourner l'ensemble de ces moments dans une direction donnée. (Les arêtes de la maille cubique, dans le cas du fer).

1.4.3 L'énergie magnéto élastique :

L'énergie d'échange a pour origine la mise en commun d'un (ou plusieurs) électrons entre deux atomes voisins et pour conséquence l'alignement des moments magnétiques microscopiques de ces deux atomes voisins.

Ainsi, dans une tôle ferromagnétique, en raison de la structure cristalline des atomes, la distance entre chaque atome est régulière, la mise en commun d'électrons se fera toujours de façon préférentielle entre les atomes les plus proches physiquement. Seule une contrainte mécanique peut modifier la distance séparant deux atomes, et par la même la mise en commun d'électrons.

Le changement de la distance entre atomes modifie l'état d'énergie et l'anisotropie.

L'énergie magnéto-élastique correspond à l'énergie mécanique qu'il a fallu fournir au matériau pour modifier les mises en commun d'électrons [4].

1.4.4 L'énergie magnétostatique :

Cette énergie est responsable à la formation des domaines de Weiss pour avoir un matériau globalement désaimanté [4].

Remarque :

La minimisation naturelle de la somme de ces différentes énergies à l'intérieur de la matière a pour conséquence l'apparition des domaines magnétiques élémentaires appelés «domaines de Weiss» (du nom de Pierre Weiss, physicien français (Mulhouse, 1865 — Lyon, 1940) qui s'intéressa au magnétisme, et montra qu'un corps aimanté est divisé en domaines à l'intérieur desquels les moments magnétiques sont ordonnés).

Au sein des «domaines de Weiss» l'aimantation est orientée suivant des directions imposées par la minimisation des différentes énergies. Elles seront majoritairement voisines des directions de facile aimantation.

En l'absence de champ appliqué et de toute autre contrainte, pour un matériau préalablement désaimanté il y a équipartition du volume des domaines entre les diverses directions d'aimantation facile et l'aimantation macroscopique résultante est nulle.

1.5 DISCONTINUITES DU PROCESSUS D'AIMANTATION

Le comportement magnétique d'un matériau se décrit en terme processus d'aimantation.

- Au niveau macroscopique, il est présenté par « le cycle d'hystérésis ».
- Au niveau microscopique, il est représenté par « le bruit Barkhausen ».

Sous l'effet d'un champ magnétique, la microstructure magnétique d'un matériau se modifie, les domaines dont l'aimantation est proche au sens de champ appliqué vont grandir aux dépens des domaines voisins, cette modification de la microstructure magnétique se traduit par le déplacement des parois de Bloch Sur leurs trajets les parois rencontrent toutes les imperfection présentes dans le cristal, telles que les lacune, précipités, et les dislocations, tous ces défauts vont agir comme des points d'ancrage qui stoppent le déplacement des parois, si le champ appliqué augmente

encore l'énergie apportée est suffisamment importante pour provoquer le décrochage de la paroi qui se déplace brusquement jusqu'aux défauts suivants

-la discontinuité de déplacement des parois dépend de la nature et de la taille de ces défauts par exemple un atome de carbone, en solution solide dans le fer ne présentera pas la même force d'encrage pour une paroi d'un autre élément, il est en général admis que les encrages les plus puissants sont donnés par les défauts de taille équivalente à l'épaisseur d'une paroi de Bloch.

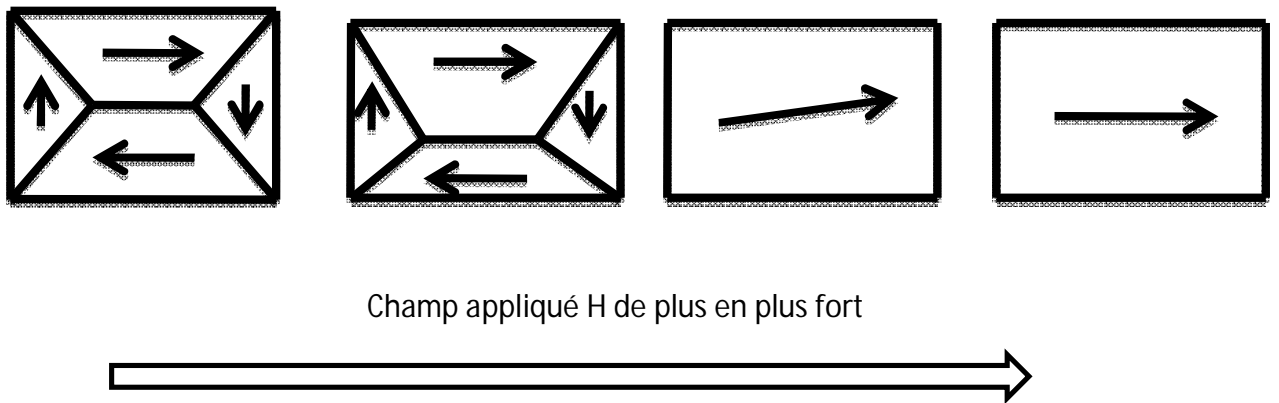


Figure 5. Discontinuité de processus d'aimantation [4].

L'ensemble de ces discontinuités qui interviennent pendant le processus d'aimantation constitue l'effet barkhausen [5] [6].

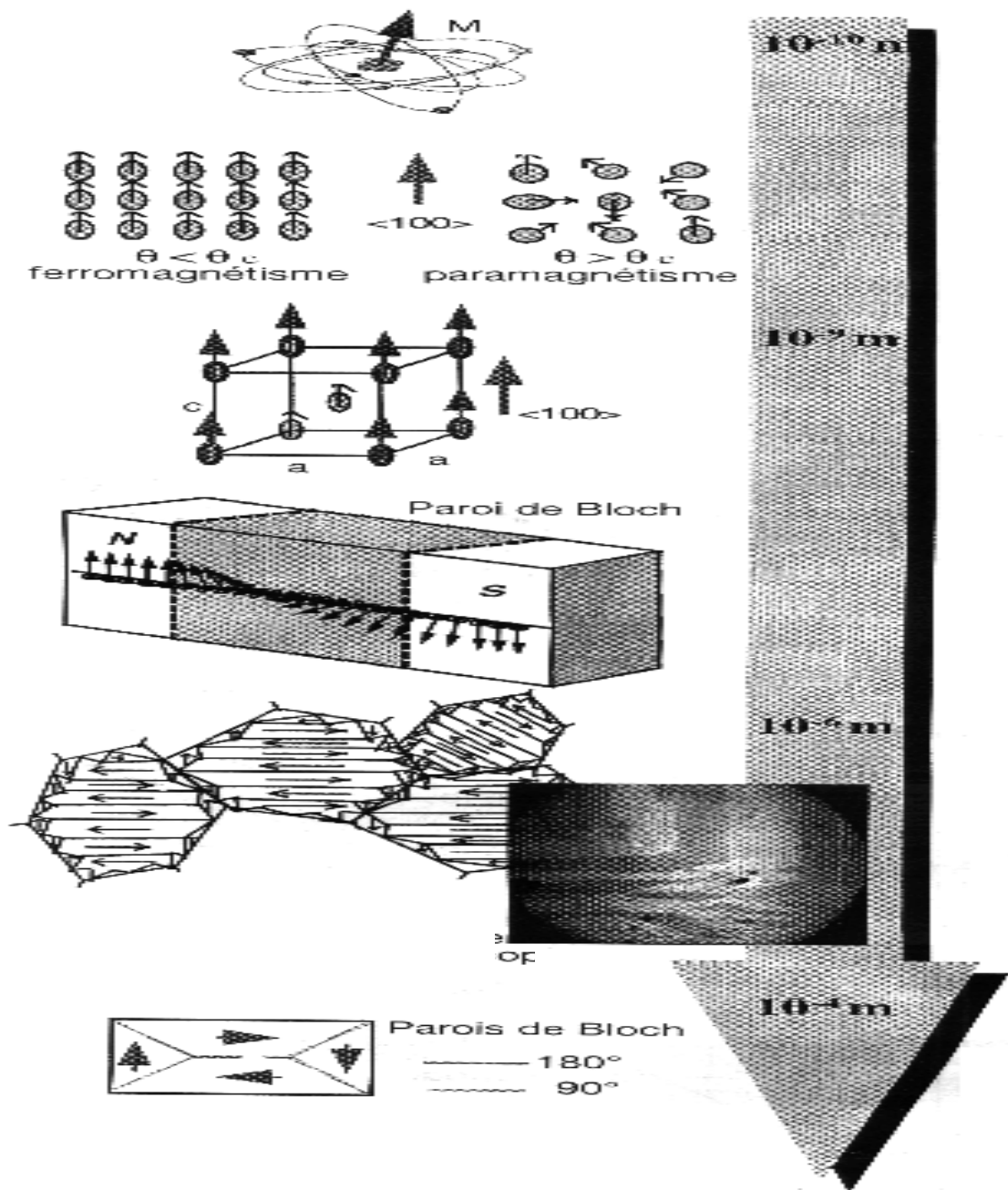


Figure 6. Schéma représentatif des propriétés ferromagnétiques à différentes échelles [5].

1.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre on a fait un rappel sur quelques notions fondamentales de magnétisme ainsi que les propriétés magnétiques des matériaux qui permettent leurs classifications du point de vue magnétique.

Le prochain chapitre sera consacré à une étude bibliographique du phénomène du bruit Barkhausen et le cycle d'hystérésis.

Chapitre 2 Approches générales sur le bruit de Barkhausen et le cycle d'hystérésis

2.1 INTRODUCTION

Parmi l'ensemble des propriétés physiques des matériaux métalliques un intérêt particulier à l'effet BARKHAUSEN est porté.

Cet attrait est motivé d'une part par la sensibilité de ce phénomène aux défauts cristallins : atomes en solutions solide, précipités, dislocations et par la possibilité de mettre en œuvre cette technique de façon non destructive d'autre part.

Dans ce chapitre, déroulons dans l'ordre de présentation l'obtention de la courbe de première aimantation puis celle du cycle d'hystérésis pour apporter quelques lumières sur l'origine du bruit BARKHAUSEN.

Tout le développement qui va suivre n'est valable que pour des matériaux ferromagnétiques.

2.2 HISTORIQUE

Depuis les premières études menées par Pierre Curie en 1895 visant à comprendre les propriétés magnétiques de la matière, d'autres travaux de recherche sont entrepris par des scientifiques dans l'étude du magnétisme.

En 1905, Langevin introduisit le concept du moment magnétique atomique permettant ainsi de comprendre certaines propriétés magnétiques des matériaux, mais il a fallu attendre la théorie de Weiss, Heinrich George Barkhausen a mis en évidence la discontinuité du processus d'aimantation sous la forme d'un bruit audible, l'expérience de Barkhausen a permis de vérifier indirectement l'existence des domaines de Weiss. Par la suite, à partir de 1928, Heisenberg par la théorie quantique a expliqué l'énergie d'échange entre deux atomes voisins ; la minimisation de cette énergie qui donne lieu

à la formation des domaines a été mathématiquement posée par Landau et Lifshitz en 1935.

La transition entre deux domaines ne peut se faire brusquement, Félix Bloch en 1932 a expliqué la structure des zones de transition entre deux domaines adjacents par des parois qui portent son nom.

2.3 POLARISATION ET CLASSIFICATION DES MATERIAUX FERROMAGNETIQUES

2.3.1 Processus de polarisation :

a. Courbe de première aimantation

Le matériau étant initialement démagnétisé, l'on fait progressivement croître le champ d'excitation dans lequel est plongé ce dernier.

La courbe représentant l'évolution de l'induction magnétique B en fonction du champ appliqué H est donnée en Figure 7 [7].

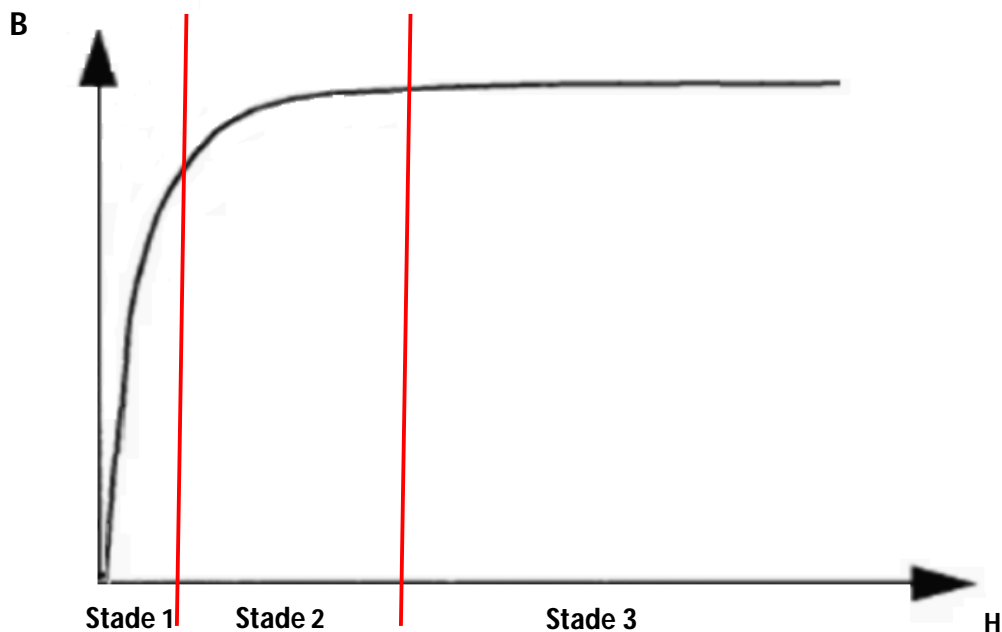


Figure 7. Décomposition de la courbe de première aimantation [7].

On y distingue trois régions :

- **Stade 1** : Une zone linéaire.
- **Stade 2** : Une zone forme de coude (appelée coude de saturation).
- **Stade 3** : Une zone de saturation.

Prenons un morceau de fer poly cristallin dans son état naturel, il est désaimanté, lorsqu'une excitation est appliqué à ce matériau la configuration en domaines va évoluer de façon à s'orienter dans le sens du champ appliqué.

- Pour des valeurs faible du champ appliqué : les domaines dont l'aimantation est proche par rapport au champ extérieur vont croître au détriment d'autre moins bien orientés (processus réversible).
- Pour des valeurs de champ plus élevés : les phénomènes s'amplifient et deviennent irréversibles, cette étape intervient jusqu'à la disparition complète des domaines défavorablement orientées.
- Pour des valeurs de champ appliqué encore plus élevées : l'aimantation dans le cristal va Quitter, une direction de facile aimantation pour s'orienter dans le sens de champ. La saturation magnétique est alors atteinte.

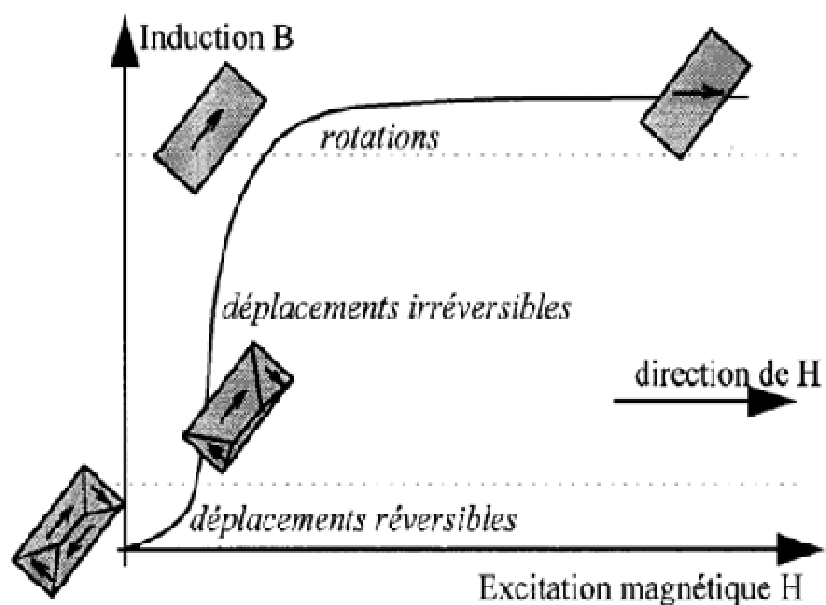


Figure 8. Courbe de première aimantation [7].

b. Cycle d'hystérésis

En faisant décroître le champ appliqué à partir de la saturation magnétique, les phénomènes inverses à ceux décrits pour la courbe de première aimantation vont se produire :

- Le retour de l'aimantation vers une direction de facile aimantation.
- La création de nouveaux domaines et de domaines de fermeture (germination).

Cependant pour une valeur de champ appliqué nulle, l'état désaimanté n'est pas obtenu, il subsiste une induction rémanente B_r . Pour trouver un matériau globalement désaimanté il est nécessaire d'appliquer un champ extérieur négatif c'est le champ coercitif H_c , cette grandeur dépend très fortement de la mobilité des parois de Bloch. L'ensemble de ces propriétés traduit le phénomène d'hystérésis, le cycle hystérésis s'obtient en ramenant un matériau de saturation à saturation en sens inverse [8].

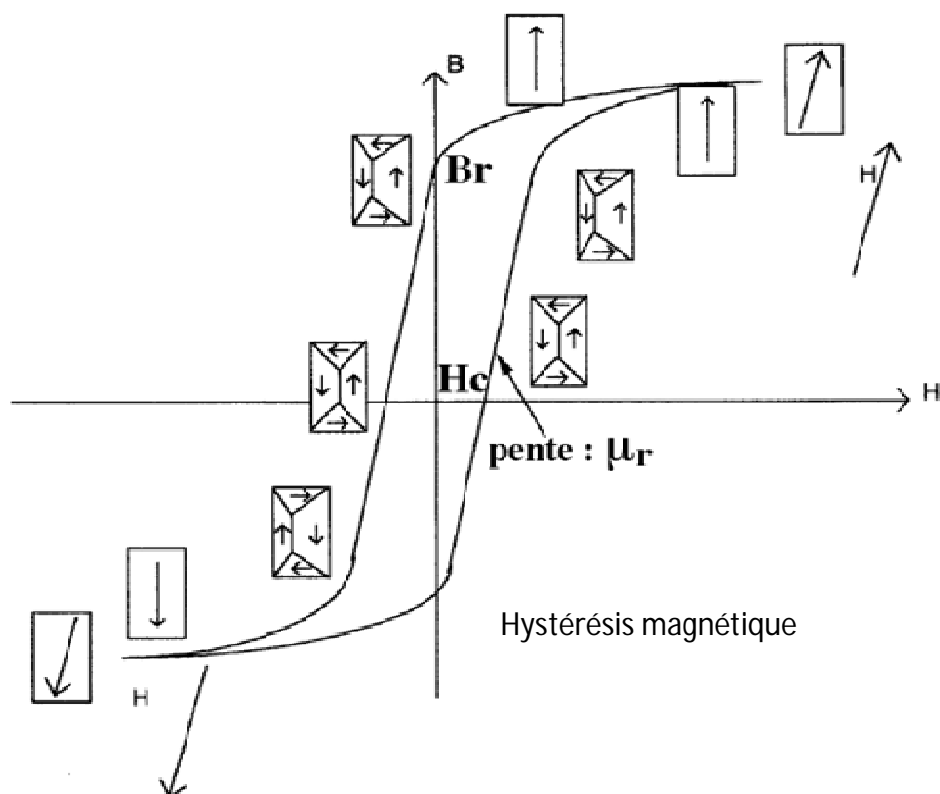


Figure 9. Cycle d'hystérésis et évolution de la micro structure magnétique [8].

Stade 1 :

Les domaines de Weiss principaux les mieux orientés par rapport à la direction du champ d'excitation magnétique (vertical ascendant dans le cas du dessin) grandissent au détriment des autres. Cette modification de la microstructure magnétique s'effectue par des mouvements de parois de Bloch à 180°.

Stade 2 :

Il correspond à la disparition des domaines de fermeture. Cette partie s'accompagne principalement de mouvements de parois de Bloch à 90°. A la fin du stade 2, chaque cristal est un mono domaine magnétique orienté dans la direction de magnétisation.

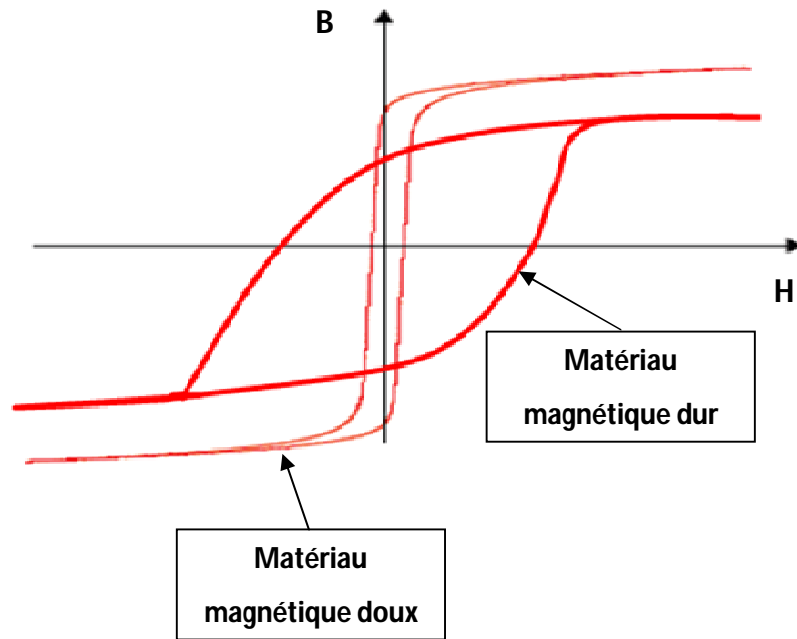
Stade 3 :

Il correspond à la saturation magnétique sous l'effet de l'excitation magnétique croissante, les moments magnétiques atomiques vont progressivement quitter les directions cristallines de facile aimantation pour s'aligner dans la direction de magnétisation. C'est un phénomène continu qui nécessite un très fort champ pour être complet (saturation magnétique).

2.3.2 Classification des matériaux ferromagnétiques suivant le cycle d'hystérésis :

L'observation des cycles d'hystérésis permet de regrouper les matériaux ferromagnétiques sous deux catégories :

- Les matériaux ferromagnétiques doux qui correspondent à des valeurs de B_r élevées et H_c faibles et dont la surface du cycle est réduite. Les matériaux les plus doux présentent une bonne pureté et peu de défauts de manière à permettre des déplacements aisés des parois de domaines magnétiques. Ces matériaux ont des applications variées (blindages, transformateurs d'impulsions et HF, filtres, amplificateurs magnétiques...)
- Les matériaux ferromagnétiques durs ou B_r est faible, H_c élevé et dont la surface du cycle d'hystérésis est plus étalée. sont utilisés dans la fabrication d'aimants permanents et les disques durs [9].



*Figure 10.*Cycle d'hystérésis pour les deux types de matériaux magnétiques [9].

2.4 BRUIT BARKHAUSEN

2.4.1 Expérience de Barkhausen :

Un aimant tourne lentement, induisant dans un barreau ferromagnétique un renversement de Polarisation selon un mouvement périodique, la période est de 1s environ, un enroulement capte les variations de flux magnétique dans le barreau, qui sont transmises après amplification à un haut-parleur [2].

Normalement aucun son audible ne devrait être émis, or à chaque renversement de la polarisation un bruit rappelant l'écoulement de petits grains dans un récipient, se fait entendre, ce problème démontre que sous l'effet de champ extérieure suffisamment important.

La polarisation ne se fait pas de façon continue, mais par petits sauts successifs:

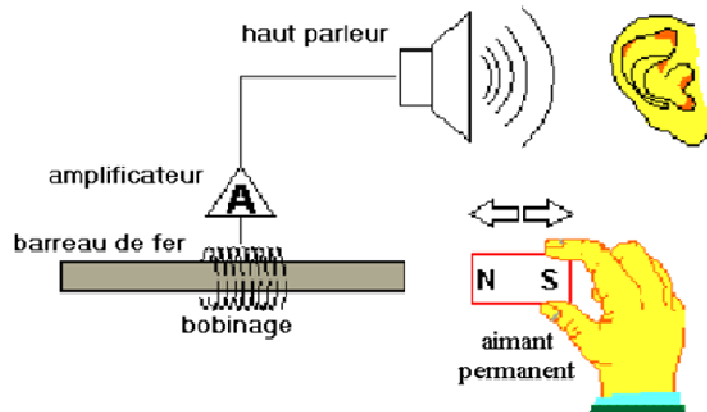


Figure 11. Expérience de Barkhausen [10].

Afin d'expliquer ce caractère, il faut imaginer l'interaction des microstructures cristallines et magnétiques. Le cristal peut contenir un grand nombre d'imperfections, précipités, lacunes, dislocation et joint de grains, pour généraliser tout ce que peut altérer la perfection de réseau cristallin.

En arrivant sur un défaut, la paroi va se bloquer et rester ancrée, si le champ appliqué augmente, la paroi va se détacher brusquement pour aller jusqu'à un nouveau défaut. La capacité qu'ont les défauts à bloquer une paroi dépend de leur nature et de l'énergie d'interaction qui existe entre eux et la paroi [10].

2.4.2 Discontinuité du processus d'aimantation:

Comme décrit précédemment, la structure en domaines s'établit spontanément pour diminuer l'énergie totale du système. L'application d'un champ externe entraîne une modification d'organisation essentiellement due aux déplacements des parois limitant les domaines, de telle sorte que bien orientés, ils augmentent de volume au détriment des ceux mal orientés. En effet, les parois ne se déplaçant pas librement, elles sont freinées par les impuretés présentes dans la matière. Ce qui correspond à un phénomène d'ancrage des parois, le déplacement de ces dernières étant discontinu, il se fait alors par saut. Les parois s'arrachent aux ancrages pour se bloquer sur nouveaux obstacles et ainsi de suite.

2.4.3 Mesure de Bruit de BARKHAUSEN :

Chaque saut d'une paroi de Bloch induit une perturbation électromagnétique, une bobine (Sonde) judicieusement placée et orienté sur le matériau permet de transformer les variations de flux induit par la perturbation en des impulsions de tension, chaque événement de Barkhausen dans le matériau induit une impulsion de tension aux bornes de la bobine réceptrice et la somme de tous ces événements forment ce qu'on appelle « bruit de Barkhausen » dont l'intensité dépend du champ appliqué et de la capacité des défauts.

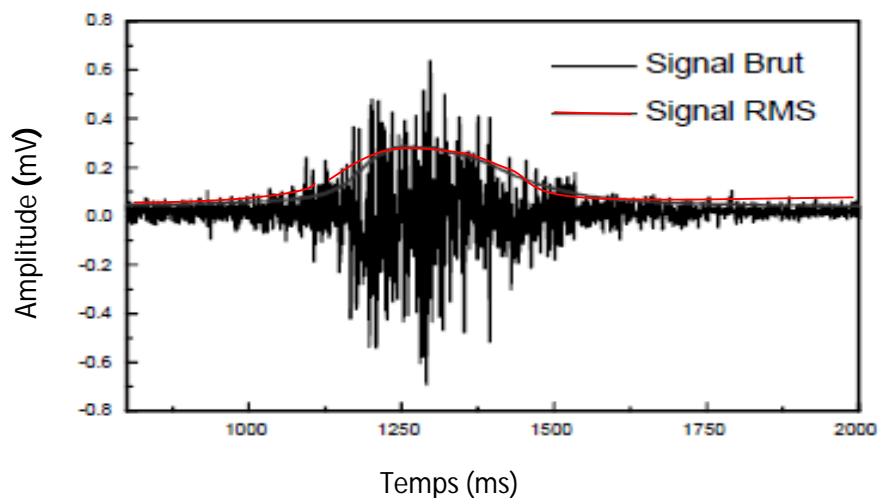


Figure 12. Exemple de Bruit BARKHAUSEN Brut et RMS [10].

2.4.4 Applications de l'effet Barkhausen au suivi des évolutions microstructurales:

L'état d'équilibre d'un matériau ferromagnétique correspond à la minimisation de toutes les énergies (énergie d'échange, énergie d'anisotropie magnéto cristalline,...). La sensibilité du comportement magnétique à des paramètres extérieurs s'explique toujours par une modification de cet équilibre [9].

a. Influence de la microstructure

Les effets de la microstructure sur le signal BARKHAUSEN sont illustrés sur la Figure 13 qui représente les réponses correspondant à trois constituants classiques des aciers tels que la ferrite (acier à 0.1% de carbone, état recuit), la perlite (acier à 0.8% de

carbure, état recuit), martensite (acier a 0.55% de carbone , état trempé après austénitisation a 875 C°.

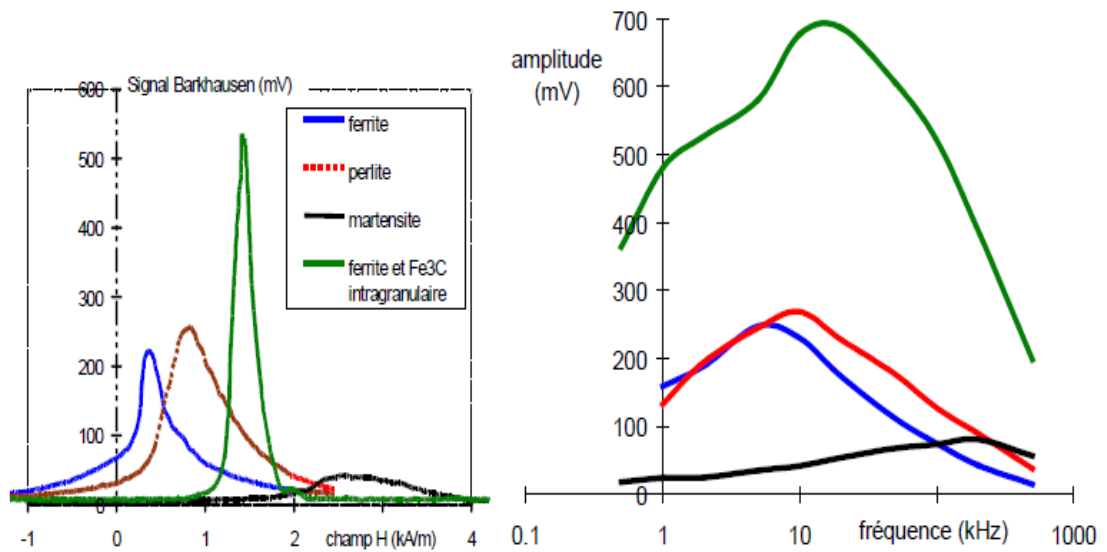


Figure 13. Signaux BARKHAUSEN et analyse fréquentielle pour différents états métallurgiques [9].

On observe pour chaque échantillon des réponses très différentes en termes de position et d'amplitude du pic.

- Pour la ferrite le maximum de réponse apparait pour un champ magnétique faible.
- La Perlite présente une forme similaire mais centrée autour d'un champ plus intense, cette différence s'explique par les obstacles plus nombreux qui freinent les mouvements des parois dans le cas de la perlite.
- Le pic martensitique est peu intense et se situe vers des champs élevés [9].

b. Influence de La taille des grains

La plupart des équipes de recherches qui ont étudiées le bruit de BARKHAUSEN rapportent que l'amplitude RMS du signal Barkhausen diminue quand la taille des grains augmente, et que l'amplitude de ces signaux augmente pour les fortes tailles de grains, ces résultats indiquent que pendant la magnétisation, les déplacements de parois seraient plus longs mais moins nombreux ce qui justifierait la diminution de l'amplitude du signal RMS [9].

c. Influence des précipitations

La précipitation elle aussi va influencer les mesures par bruit Barkhausen, l'effet de la précipitation varie suivant la taille des précipités.

Quand la taille des précipités est de l'ordre de grandeur de l'épaisseur des parois environ $0.03\mu\text{m}$ l'influence sur le bruit Barkhausen est maximale. Et si les précipités sont de taille plus importante, les précipités vont seulement jouer le rôle de site de nucléation pour des domaines de fermeture [11].

d. Influences de l'état de contrainte

Le bruit Barkhausen est aussi très sensible aux contraintes appliquées ou résiduelles. D'une part, la déformation plastique introduit dans le matériau des défauts cristallins qui vont modifier la structure magnétique mais aussi jouer le rôle d'obstacles aux parois de Bloch.

Ainsi la présence de dislocation durcit magnétiquement le matériau. D'autre part, la déformation élastique du réseau modifie l'énergie de magnétostriction et donc la microstructure magnétique.

Les mesures en bruit Barkhausen réalisées sur divers aciers montrent que, pour une mesure du signal Barkhausen avec une magnétisation dans le sens de la contrainte :

- En traction, l'amplitude du pic Barkhausen augmente.
- En compression, non seulement l'amplitude du pic diminue, mais on observe de plus, l'apparition d'épaulements de part et d'autre du pic Barkhausen, attribué au mouvement de parois à 90° [10].

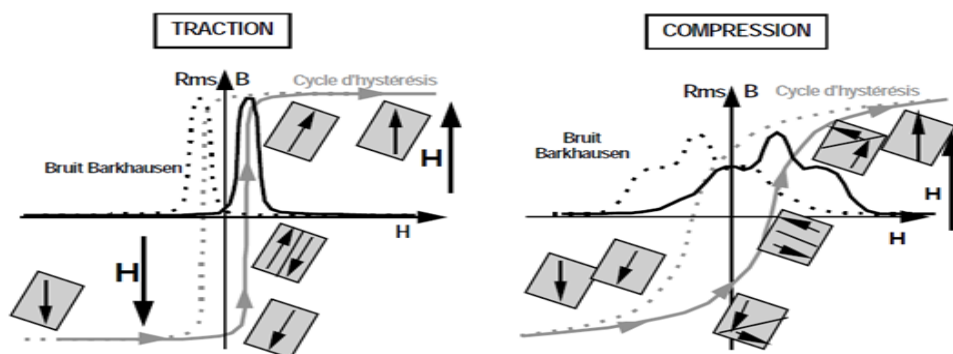


Figure 14. Explication qualitative de la sensibilité à la contrainte [9].

2.5 CONCLUSION

La magnétisation d'un matériau ferromagnétique de saturation à saturation telle que nous l'avons décrite se fait par modification de la microstructure magnétique. Le phénomène de magnétostriction intervient dans ce processus.

Nous remarquons une très grande sensibilité du bruit Barkhausen aux différents paramètres de la microstructure cristalline des aciers. De plus, cette technique semble pouvoir apporter des informations séparées entre les différents éléments (précipités, joint de grains) ou les différents constituants.

Chapitre 3 La chaîne de mesure

3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre est destiné à la présentation de la réalisation du dispositif électronique que nous avons élaboré pour mesurer un phénomène électromagnétique très tenu et de relative haute fréquence. En outre ce système permet le tracé du cycle d'hystérésis.. En se basant sur l'aspect micro magnétique et donc microstructural du matériau.

La génération du bruit de Barkhausen consiste à magnétiser les pièces à contrôler jusqu'à la saturation avec un électroaimant alimenté par un signal triangulaire de forte puissance, le signal mesure peut être acquis de manière informatique. Comme nous envisageons de faire plusieurs essais, les mesures doivent être archivées puis restituées sous une forme simple pour leur interprétations, nous présenterons ensuite le montage adopté, mis au point et construit nous ayant permis des conditions de mesures satisfaisantes.

3.2 POSITION DU PROBLEME

La technique de mesure du bruit Barkhausen nécessite un appareillage de mesure qui doit reposer sur deux points :

- Mesurer le phénomène électromagnétique le plus proprement possible et présenter les résultats sous forme exploitable.
- Choisir des matériaux qui présentent une structure simple et bien définie.

En effet, le cahier des charges a imposé la réalisation d'une chaîne d'acquisition et de mesure du bruit de BARKHAUSEN.

L'objectif fixé étant l'extraction d'un maximum d'information utile, dans un paysage sonore fortement affecté par les différents bruits de fond qui nous impose les précisions qui suivent.

Il existe en physique des phénomènes qui, produits de façon apparemment identique un grand nombre de fois, donnent à chaque expérience des résultats qui semblent imprévisible.

Nous dirons alors que de tels phénomènes sont aléatoires. Dans le système de traitement de signal ou dans ceux de communication, l'aspect imprévisible que présentent certains phénomènes a essentiellement deux origines distinctes :

- La connaissance incomplète de l'état du système, qui résulte de la nécessité pratique de limiter à une étude macroscopique les phénomènes observés, un exemple est le bruit d'origine thermique qui intervient de façon indissociable dans tous les circuits électronique et qui est produit par l'agitation incessante d'un grand nombre de particules.
- L'ignorance a priori, pour le destinataire d'une chaîne de communication, de la forme du message émis par la source, si non à quoi cela servirait-il de le lui transmettre.

Pour étudier leur évolution au cours du temps, l'idée consiste à recourir aux méthodes probabiliste. Dans ce cadre les grandeurs observables sont modélisées par une famille de variables aléatoires indexées par le temps, chacune d'elle décrivant l'aspect incertain du phénomène observé à un instant donné. La théorie du traitement du signal offre un outil mathématique particulièrement bien adapté. Il est important de caractériser ce que représente le caractère utile d'un signal, En effet on pense le plus souvent que le bruit est un signal aléatoire qui se superpose au signal utile. En réalité les notions de signal et bruit sont très relatives. En effet, pour un technicien des télécommunications qui écoute un émetteur lointain relayé par un satellite , le signal provenant d'une source astrophysique (soleil , quasar) placée malencontreusement dans la même direction est un bruit mais pour l'astronome qui s'intéresse à la source astrophysique , c'est le signal du satellite qui est gênant, ainsi le bruit est défini comme l'entité qui se superpose au signal que nous voulons étudier .

Un système de mesure a d'une façon générale la structure ci-dessous Figure 15, le phénomène physique que l'on veut étudier est présenté à un capteur qui le transforme en un signal électrique tension ou courant (plus rarement un signal optique).A ce niveau déjà un bruit est ajouté. L'ensemble chemine sur un canal de

transmission lui-même bruyant .Il atteint enfin le récepteur derrière lequel est effectué le traitement.

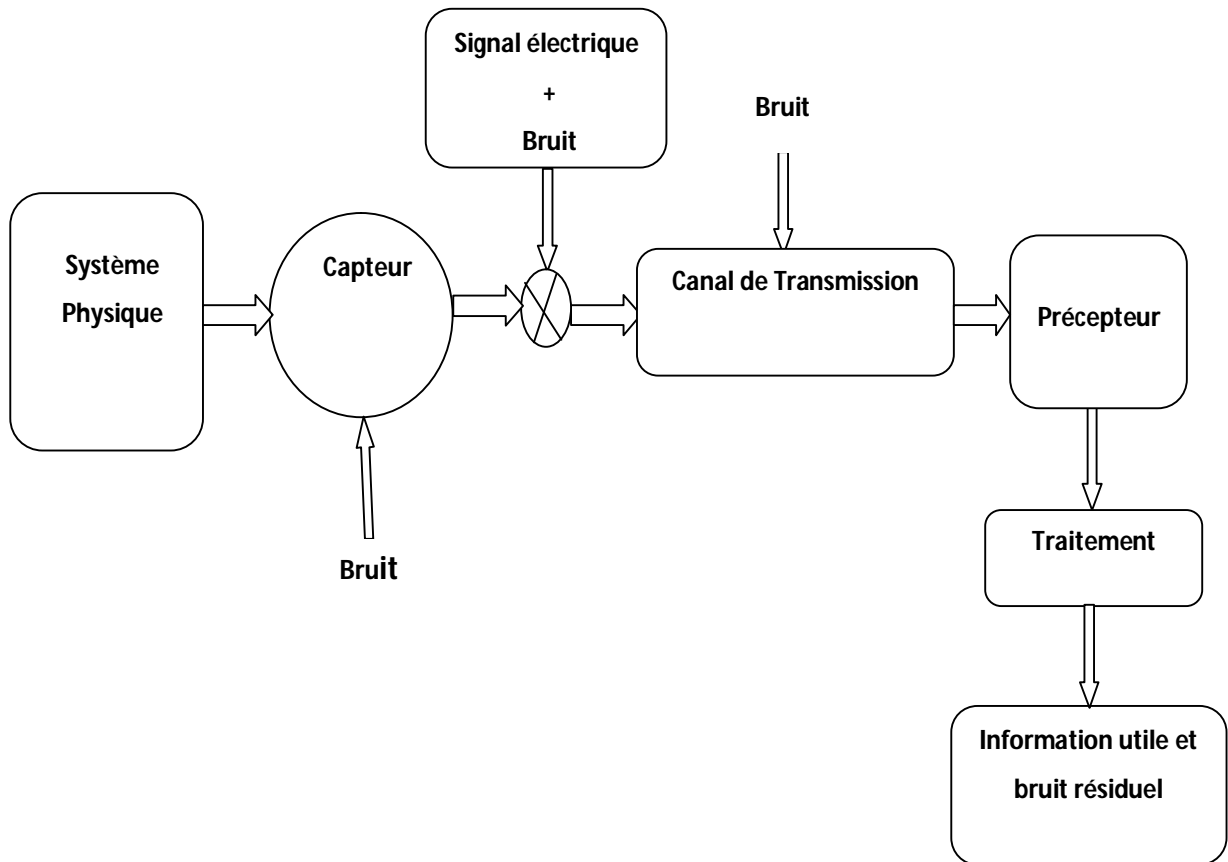


Figure 15. Structure générale d'une chaîne de mesure.

Afin d'affiner les conditions de mesure, il nous fallait donner la possibilité à l'information sonore de parvenir de la source d'émission au palpeur altération c'est ce qui a imposé l'architecture de notre schéma synoptique.

3.3 FORMULATION SYNOPTIQUE

Le dispositif de mesure de la Figure 16 comporte habituellement trois parties :

- Un dispositif d'excitation magnétique.
- Un capteur permettant de se positionner dans la zone utile d'étude tout en la magnétisant (ensemble : bobine – capteur – bobine encerclante).
- Une électronique de mesure (dispositif du traitement des signaux acquis).

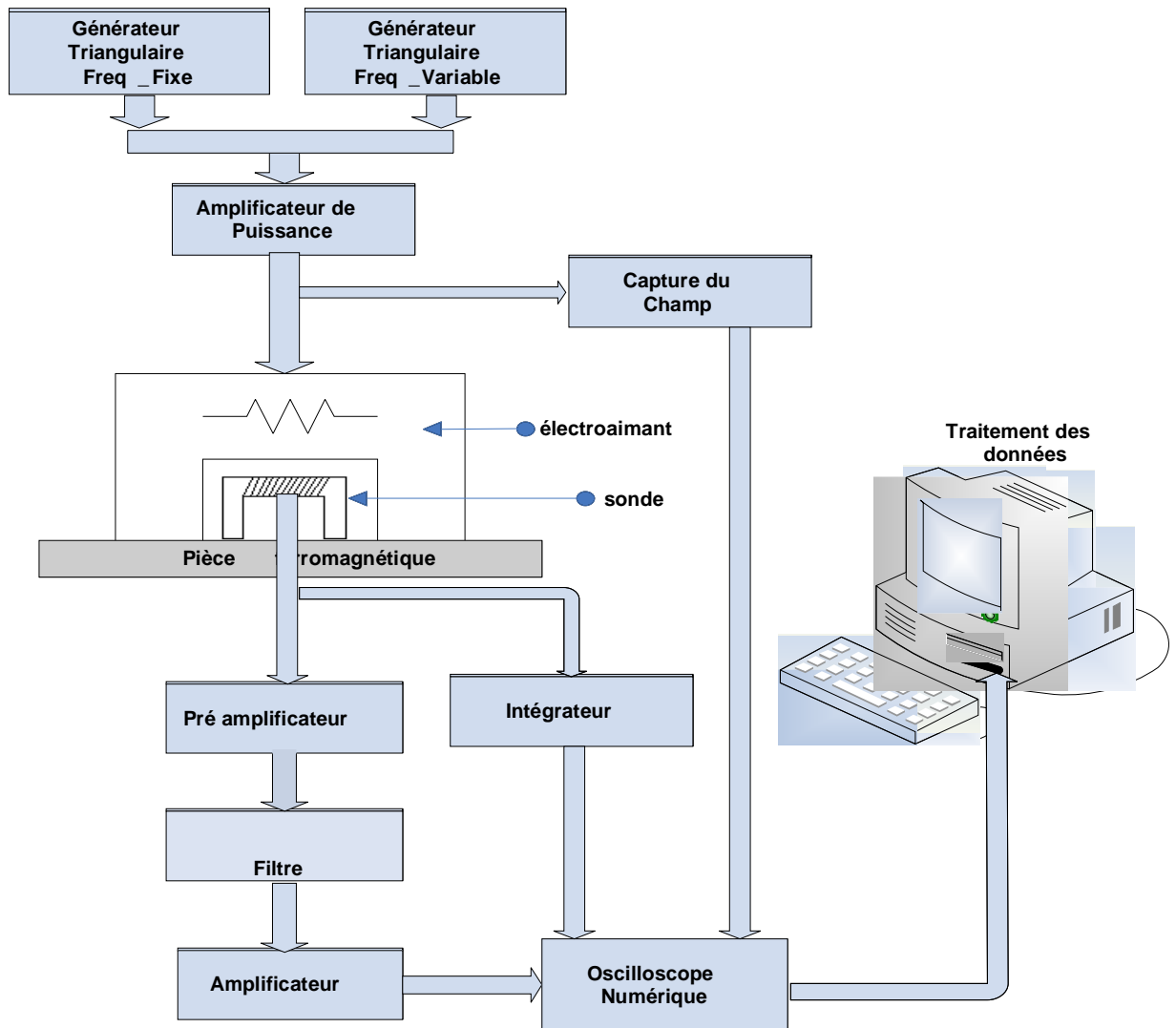


Figure 16. Schéma synoptique complet de l'appareil de BARKHAUSEN [12].

Une excitation magnétique triangulaire basse fréquence de (0.01 à quelque Hz) est nécessaire pour induire des variations importantes de flux dans l'éprouvette d'analyse afin de la saturer magnétiquement.

Ces variations de flux seront mesurées intégralement par la bobine _ capteur encerclante constituée de 1200 spires, d'un fil de diamètre de 0.1 mm, et dont l'impédance totale est de l'ordre de 50 Ω , à la fréquence de travail.

Le signal prélevé grâce à la bobine contient de la superposition de deux informations importantes, l'une de forte amplitude de l'ordre de quelques dixièmes de volts et considérée comme indésirable. L'autre caractérisant le véritable signal de BARKHAUSEN de très faibles valeurs pour être proprement mesuré.

Afin de traiter convenablement « le signal de Barkhausen », une amplification est nécessaire pour augmenter le niveau du signal. Le gain en tension de ce dernier a été choisi de l'ordre de 25, de manière à éviter la saturation sur la composante basse fréquence.

Il est à noter également que toute perturbation sur le courant d'excitation (en particulier le 50 Hz) sera détectée par le capteur. En raison de cette double sensibilité et de la nécessité d'éliminer les composantes basse fréquences, la bande de fréquence couramment utilisées pour la mesure doit s'étaler de (1 à 100) KHz.

Un filtre du type passe haut du troisième ordre, couvrant la gamme moyenne fréquence a été prévue au niveau du laboratoire. La coupure en haute fréquence est liée à la bande passante des amplificateurs utilisés, cette dernière couvrant une bande de l'ordre de 200Khz [12].

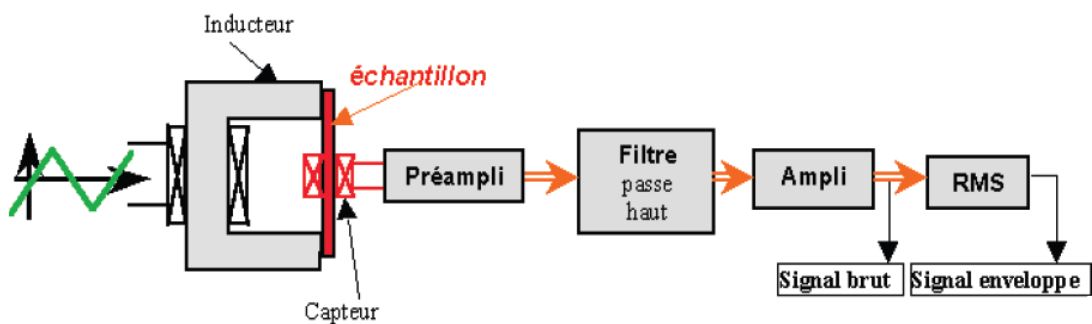


Figure 17. Schéma de principe de l'appareillage BARKHAUSEN [12].

3.4 DISPOSITIF D'EXCITATION MAGNETIQUE

Afin de fournir la puissance nécessaire à la bobine inductrice du capteur pour créer l'excitation magnétique, il est nécessaire de tenir compte des paramètres suivants :

- ❖ Générateur de l'onde triangulaire à fréquence variable.
- ❖ Amplificateur de puissance.
- ❖ Circuits magnétiques [13].

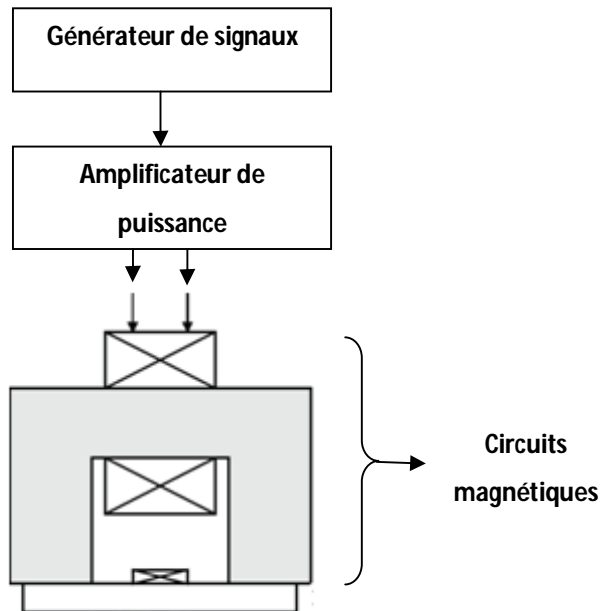


Figure 18. Dispositif d'excitation magnétique [13].

3.4.1 Générateur d'onde triangulaire :

L'utilisation d'un signal triangulaire permet un contrôle plus rigoureux des conditions de magnétisation car il comporte la particularité d'assurer une excitation magnétique à vitesse constante.

Il existe plusieurs possibilités de circuits permettant de générer des signaux. Comme notre choix s'est porté sur une forme d'onde triangulaire, nous nous sommes intéressés au circuit intégré XR2206 pour produire la fonction souhaitée [12].

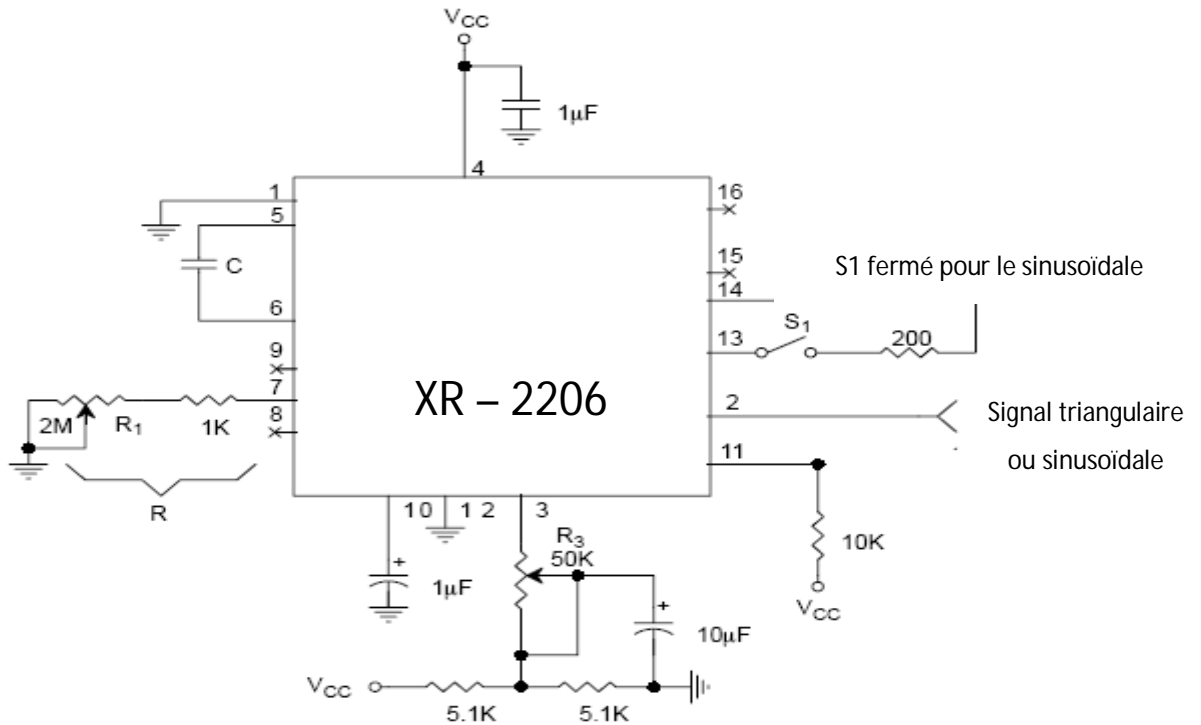


Figure 19. Schéma de principe du générateur.

Les signaux sinusoidaux, triangulaires, carrés et rampe produits se sont avérés de très bonne qualité pour avoir présente une grande stabilité et précision par rapport au temps (absence de distorsion de l'information générée pendant toutes les durées de tests). La fréquence de l'opération peut être choisie extérieurement au circuit grâce à un jeu de condensateur et de résistance qui sur indication du constructeur,

doit vérifier l'opération suivante : $f = \frac{1}{RC}$

Ce qui nous a permis de couvrir la gamme de fréquences allant du centième d'hertz à plusieurs mégahertz.

3.4.2 L'amplificateur de puissance :

Le signal triangulaire obtenu à la sortie du générateur est un signal à faible puissance surtout que le montage est à base des amplificateurs opérationnels, pour cela on a besoin d'un étage de puissance qui peut fournir un courant de l'ordre de 5A suffisant

pour la création d'un champ magnétique important capable de saturer les pièces à contrôler Cette valeur de courant est dépendante de l'électroaimant réalisé.

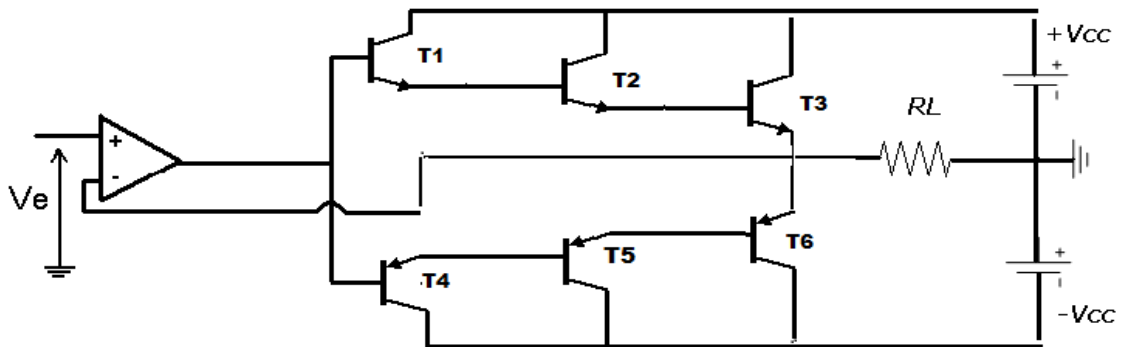


Figure 20. Schéma de principe de l'amplificateur de puissance.

Comme les transistors (T1,T2,T3) et (T4, T5,T6) présentent des caractéristique théoriquement identiques , le montage utilisé peut être ramené a son équivalent électrique que traduit la Figure 21 dans laquelle sont exposés la fonction de transfert du montage ainsi que le signal de sortie associés pour le type de signal triangulaire appliqué

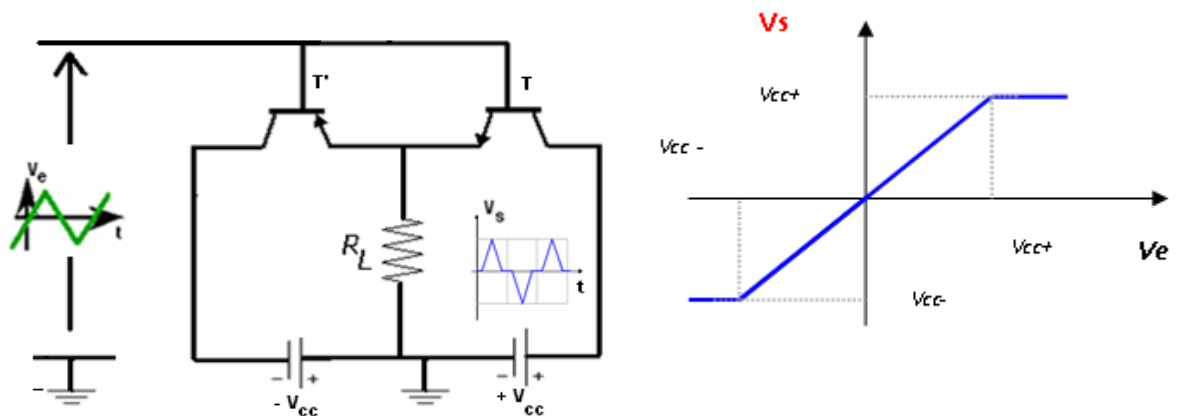


Figure 21. Montage équivalent et la fonction de transfert.

3.4.3 Etage circuits magnétiques :

Dans les circuits magnétiques des machines et appareils électriques on doit créer sur une certaine partie une induction magnétique de valeur requise par les conditions de fonctionnement du dispositif.

Le calcul d'un tel circuit a donc pour but de déterminer la force magnétisante nécessaire pour produire l'induction magnétique déterminée.

Ce calcul est basé sur la loi de courant total suivant laquelle la force magnétisante est égale à la somme des tensions magnétiques sur les parties partielles du circuit.

$$\sum_{k=1}^N H_k L_k = \sum I$$

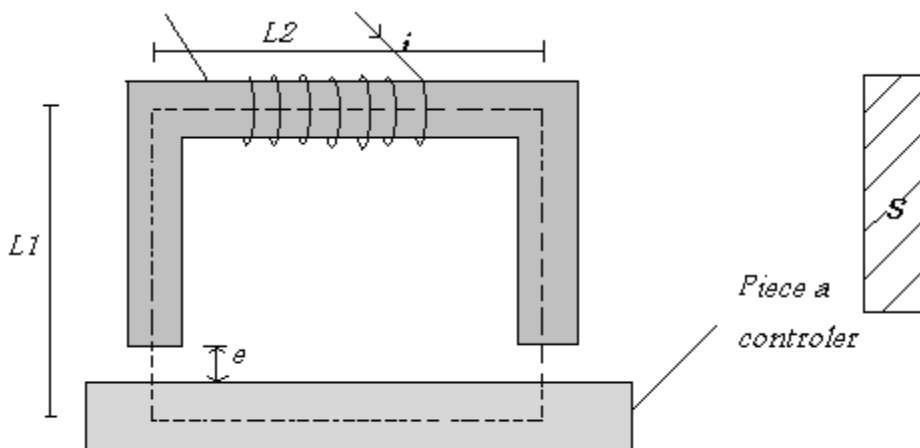


Figure 22. Le circuit magnétique pour saturation des pièces.

Pour faire cette étude il faut connaître les paramètres physiques qui caractérisent un circuit magnétique:

a. Le flux magnétique

Le flux du vecteur d'induction magnétique B à travers une surface fermée (S) est définie par:

$$\Phi_s = \iint_{(s)} \vec{B} \cdot \vec{nds} \dots\dots\dots(1)$$

Avec \mathbf{n} : vecteur normal à la surface S.

b. La force magnétomotrice f

$$f = ni \dots \dots \dots (2)$$

n : le nombre de spire de la bobine.

i : le courant traversant la bobine.

c. La reluctance d'un circuit magnétique homogène

$$\mathfrak{R} = \frac{1}{\mu} \frac{l}{S} \dots \dots \dots (3)$$

l : longueur moyenne du circuit magnétique.

S : section du circuit magnétique.

μ : La perméabilité magnétique.

d. La formule d'hopkinson

Dans le cas d'un circuit magnétique non homogène la relation d'Hopkinson relie le flux dans le circuit magnétique Φ au courant i .

((Somme algébrique)).

$$\sum Ni = \sum \mathfrak{R}\Phi \dots \dots \dots (4)$$

Le flux à travers toutes les spires est alors:

$$\Phi_T = N\Phi = NSB) \dots \dots \dots (5)$$

En combinant (4) et (5), on obtient :

$$\Phi_T = \left(\frac{N^2}{\mathfrak{R}}\right)i \dots \dots \dots (6)$$

Ce coefficient de proportionnalité entre flux et courant est le coefficient *d'auto-induction* (l'inductance):

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \dots \dots \dots (7)$$

e. La force d'attraction ou portante F d'un électroaimant

L'attraction à lieu dès que le flux est suffisant pour permettre à l'armature mobile de vaincre le couple résistant qui lui est appliqué au repos.

$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx}$$

$$L(x) = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} = N^2 \left(\frac{\mu_0 S}{x} \right)$$

$$F = \frac{1}{2} i^2 N^2 \frac{d\left(\frac{\mu_0 S}{x}\right)}{dx}$$

$$F = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S} \dots \text{avec} \quad \Phi = BS$$

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \dots \dots \dots (8)$$

La formule de MAXWELL n'est pratiquement valable qu'au cas où l'armature mobile est sensiblement au contact du noyau.

Dans notre travail on a réalisé quatre circuits magnétiques:

Deux électroaimants à noyau en acier doux de dimensions différents pour avoir un system d'excitation adapté à tous les formes des pièces a contrôlées.

Deux capteurs électromagnétiques, un bâtonnet en ferrite et un autre en acier doux à forme de U. cela est fait suivant les exigences des géométries de forme.

3.5 CONCEPTION ET CARACTERISATION DES CAPTEURS

3.5.1 Capteur en acier doux :

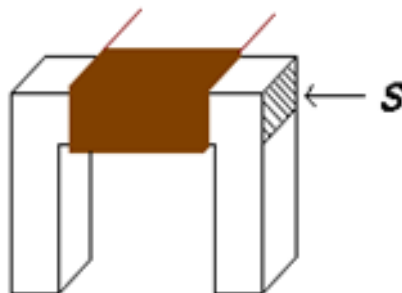


Figure 23. Capteur en acier doux.

On a réalisé un capteur électromagnétique à noyau en acier doux dont la forme est illustrée dans la Figure 23.

Nombres de spires	Section du fil	Diamètre du fil
121	0.37 mm ²	0.70 mm

Tableau 1. Caractéristiques du capteur utilisé.

La fonction du capteur est de traduire les variations du flux qui traversent la surface de son bobinage en une tension électrique.

Cet électroaimant est utilisé pour magnétiser des pièces de petites tailles, mais dans le cas général on utilise un électroaimant plus sensible (N= 500 spires).

3.5.2 Capteur en ferrite :

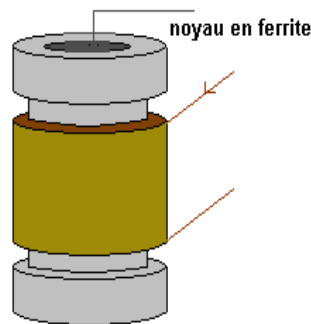


Figure 24. Capteur en ferrite.

Sous l'effet d'un champ magnétique, la réorganisation de La microstructure magnétique se fait par des déplacements des parois de Bloch, ces déplacements sont brusques et saccadés, localement à chaque saut de paroi il résulte une modification locale et brutale de l'aimantation du matériau qui entraîne de petites variations du flux magnétiques. Elles sont mesurables en surface dans la section d'une bobine et de la tension $e(t)$ aux bornes de cette bobine est donnée par loi de Lenz- faraday

$$e(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(9)$$

Pour notre cas on a utilisé un capteur de coté qui est constitué d'une petite bobine placée autour d'un noyau de ferrite , le signal étant plus faible, nous utilisons une

bobine de 800 spires et diamètre 0.1 mm , les spires sont jointives et bobinées sur plusieurs couches autour de la tige en ferrite.

3.6 DISPOSITIF D'ACQUISITION ET DU TRAITEMENT DES SIGNAUX

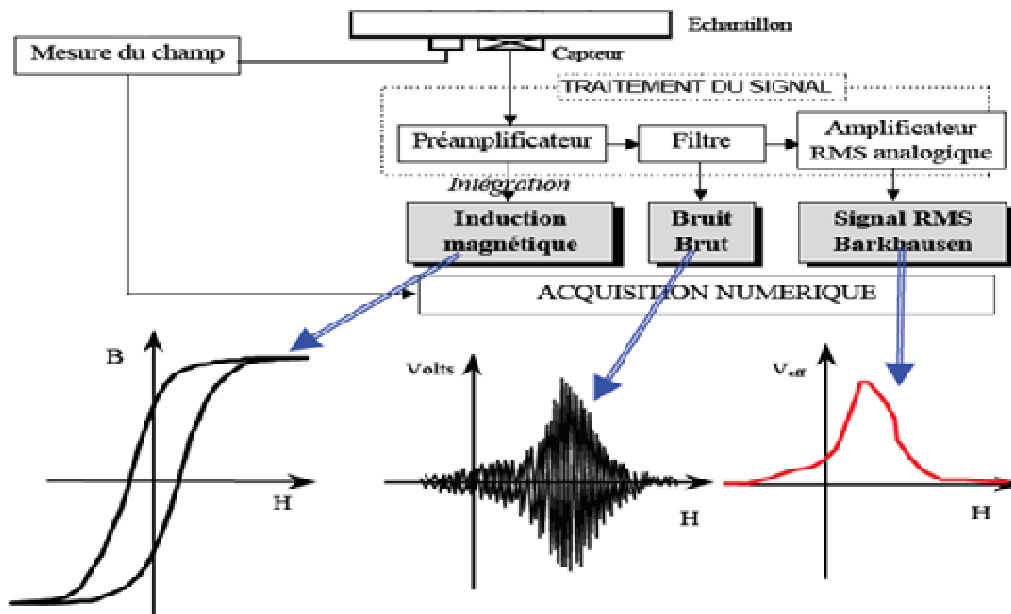


Figure 25. Dispositif d'acquisition et du traitement des signaux [12].

Le dispositif du traitement du signal dans le système Barkhausen passe par trois étapes [12] :

- ❖ La pré amplification
- ❖ Le filtrage
- ❖ L'amplification
- ❖ Le tracé du cycle d'hystérésis

3.6.1 Etage de pré amplification :

Le préamplificateur joue un rôle fondamental, de lui dépend toute la qualité de la mesure. Il a pour buts d'adapter les impédances et d'augmenter le niveau du signal en sortie de la bobine. Il est placé le plus près possible du capteur afin d'effectuer une

mesure de tension, en particulier pour des fréquences élevées, et d'être moins sensible aux parasites.

La nécessité d'obtenir : un gain de l'ordre de 100, un faible niveau de bruit à l'entrée, une large bande passante au moins jusqu'à 1MHz, une impédance d'entrée la plus grande possible, nous a conduit au choix suivant :

- Ampli opérationnel très faible bruit large bande. Nous avons choisi l'OP37G de
- Un montage à deux étages avec un gain de l'ordre de 10 chacun, permettant d'augmenter la bande passante (produit gain bande passante).

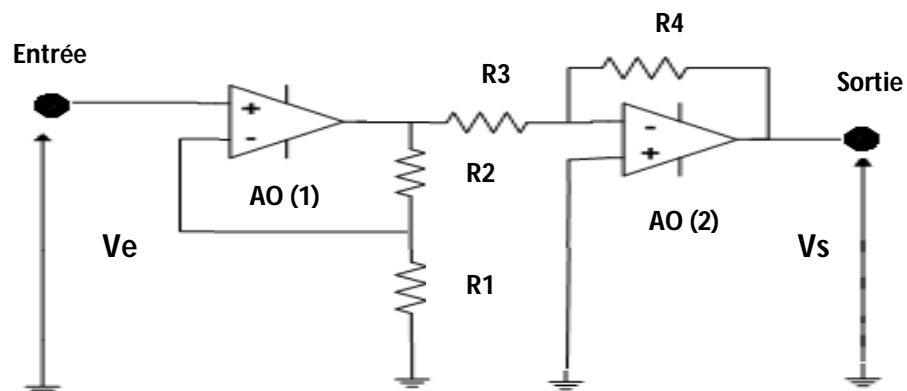


Figure 26. Préamplificateur à deux étages [12]

$R1=100\Omega$, $R2=1K\Omega$, $R3=10K\Omega$, $R4=100K\Omega$.

- Le premier étage constitué de l'AO(1) est un amplificateur non-inverseur ayant une impédance d'entrée la plus grande possible, pour un courant d'entrée de l'ordre de quelques nA avec un gain de 11.
- Le deuxième étage contenant l'AO(2) monté en inverseur permet d'avoir une faible impédance de sortie pour un gain de 10.
- Le gain sera de l'ordre de 110 pour l'ensemble [12].

3.6.2 Etage d'amplification et filtrage :

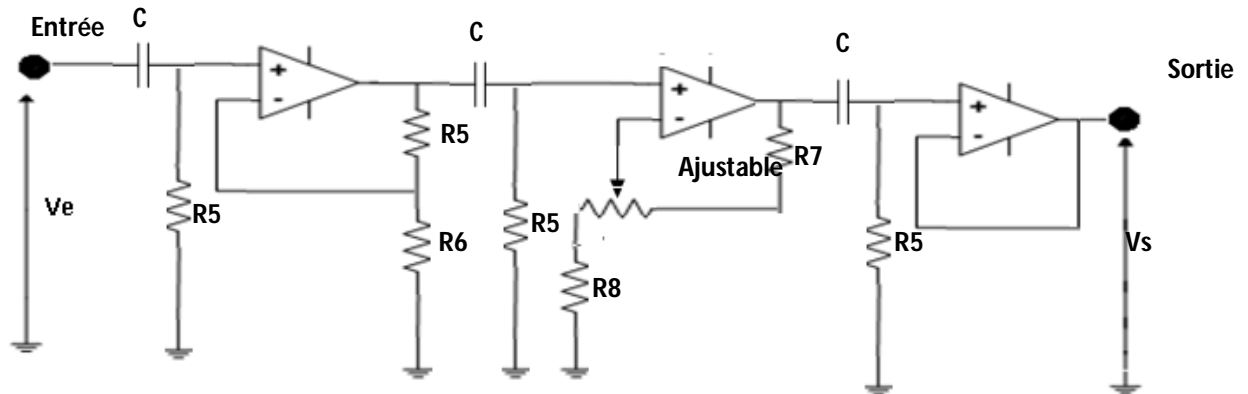


Figure 27. Filtre passe haut [12]

$R5=2.2K\Omega$, $R6=2K\Omega$, $R7=20K\Omega$, $R8=1K\Omega$. $C=0.1 \mu F$.

Comme la réorganisation des domaines de Weiss par déplacement des parois produit des perturbations magnétiques qui engendrent le bruit dans une large gamme de fréquence (de quelques Hz à plusieurs KHz). Le filtre choisit Figure 27. de type passe haut et du troisième ordre a été utilisé pour optimiser le rapport signal sur bruit. Il y a lieu de choisir une gamme de fréquence où le signal mesuré représente le mieux le phénomène bruit de Barkhausen.

L'opération du filtrage est très importante dans notre étude parce qu'on capte tous ce qu'il y a dans l'environnement de signaux électromagnétiques. Or il est impératif d'éliminer tous ces parasites qui permettent d'altérer nos résultats.

La procédure de vérification de ces caractéristiques, à savoir l'ajustement de sa bande passante a été identique à celle du préamplificateur puisqu'il nous suffisait de faire varier la valeur des condensateurs pour ajuster la bande passante.

L'amplification du signal Barkhausen après filtrage est nécessaire afin de le ramener à un niveau acceptable.

Les deux premiers étages présentent chacun un gain de 10, ils ont été réalisés à partir d'amplificateurs opérationnels "OP 37". Pour le troisième étage, (montage suiveur), le gain étant de 1, nous avons utilisé un "OP 27", car l'OP 37, de plus large bande

passante, n'est utilisable que pour des gains supérieurs à 5, l'OP 27 offre les mêmes avantages sauf que son produit gain bande passante est inférieur à 8 MHz [12].

3.6.3 Trace du cycle d'hystérésis:

A l'échelle macroscopique les matériaux ferromagnétiques sont caractérisés par le cycle d'hystérésis, le tracé de ce dernier consiste en la capture des variations du vecteur de l'induction magnétique(B) en fonction du vecteur du champ d'excitation (H).

a. Capture du champ magnétique H

La formule qui lie le paramètre magnétique H au paramètre électrique I c'est la loi de courant total

$$H = \frac{N}{L} I \dots\dots\dots (10)$$

Ou : N: nombre de spires, L : la longueur du circuit magnétique.

Il existe une relation linéaire entre le courant électrique qui circule dans le bobinage de l'électroaimant et le champ d'excitation magnétique créé par ce dernier.

Si on fait appel à une résistance de 1Ω en série avec l'électroaimant on obtient l'image du courant de l'électroaimant aux bornes de cette résistance.

Or R=1Ω d'où V=I

$$H = \frac{N}{L} I \quad \Rightarrow \quad V = I = \frac{L}{N} H = \alpha H \quad \text{Avec } \alpha = N/L$$

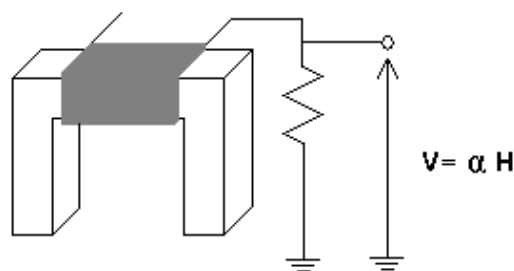


Figure 28. Capteur du champ d'excitation (H).

b. Capture du champ d'induction magnétique B

A l'heure actuelle tous les appareils et dispositifs de mesure de l'induction magnétique B sont à la base de l'effet hall mais ce type de capteur présente une sensibilité de

mesure faible. Le capteur qu'on a réalisé traduit les variations de flux qui traversent la surface de son bobinage en une tension électrique, mais il y a le facteur dérivé entre le paramètre électrique (tension) et le paramètre magnétique (induction).

La formule suivante montre cette liaison :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -NS\left(\frac{dB}{dt}\right) \dots\dots\dots(11)$$

Alors la mesure de l'induction (B) s'est faite grâce à la réalisation d'un intégrateur à base d'un amplificateur opérationnel Figure 29.

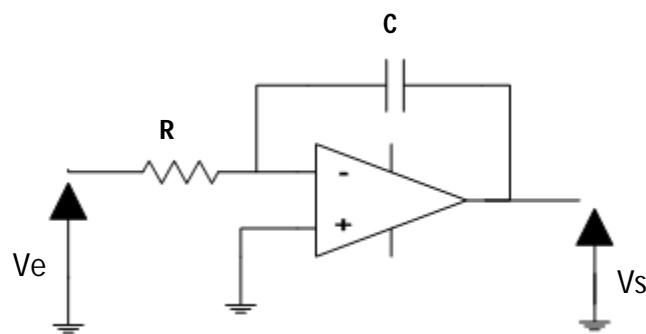


Figure 29. Schéma de principe de l'intégrateur

R=680 Ω, C=1 μF.

Afin de fixer la fréquence de coupure basse à une valeur minimale dans le cas du régime harmonique, l'insertion d'une résistance « R'=10×R » en parallèle avec le condensateur « C », s'est avérée nécessaire pour obtenir une faible pulsation réglable par les valeurs de R et C choisies.

3.7 CAGE DE FARADAY

La chaîne de mesure que nous avons réalisée est très sensible aux nuisances électromagnétiques extérieure ce qui influe sur la précision de nos mesures, pour protéger notre montage contre ces nuisances on utilise ce qu'on appelle **cage de Faraday**, cette dernière est formée d'une enveloppe continue d'un matériau conducteur ce qui lui permet d'être étanche aux ondes électromagnétique de telle sorte que les ondes et les courants électrique circulent sur l'enveloppe, mais ne peuvent pénétrer.

On parle aussi de blindage électrique qui constitue une protection où les parasites électriques et électromagnétiques sont acheminés vers la masse mécanique et électrique du dispositif ou de la machine [13].

3.8 CONCLUSION

Après avoir réalisé le dispositif de mesure du bruit de Barkhausen et traceur du cycle d'hystérésis, des tests seront effectués sur des pièces de même type et de mêmes dimensions mais ayant subies des modifications structurales différentes.

Chapitre 4 Applications et traitement numérique

4.1 INTRODUCTION

Un signal est le canal physique de l'information qu'il transporte de sa source à son destinataire : c'est le véhicule de l'intelligence dans les systèmes.

Le traitement numérique des signaux consiste à traiter des nombres en vue d'extraire de l'information utile.

Ce chapitre est destiné à présenter les outils de base que nous avons utilisés lors du traitement numérique de nos signaux. Selon que le signal ait été du type déterministe ou aléatoire, des traitements tels que : la FFT, la DSP, la réponse temps-fréquence, l'extraction de l'enveloppe du signal, la visualisation du cycle d'hystérésis et enfin l'autocréation et l'histogramme ont été appliqués

4.2 SCHEMA SYNOPTIQUE

Actuellement dans le domaine du CND la sensibilité des équipements est importante, dans ce chapitre nous allons vérifier l'efficacité du système réalisé, et cela en déterminant la sensibilité de bruit de Barkhausen (BN) et la courbe de cycle d'hystérésis aux différents défauts qu'on a réalisés sur des pièces ferromagnétiques.

Le système de mesure de bruit de BN utilisé est schématisé ci-dessous Figure 30 :

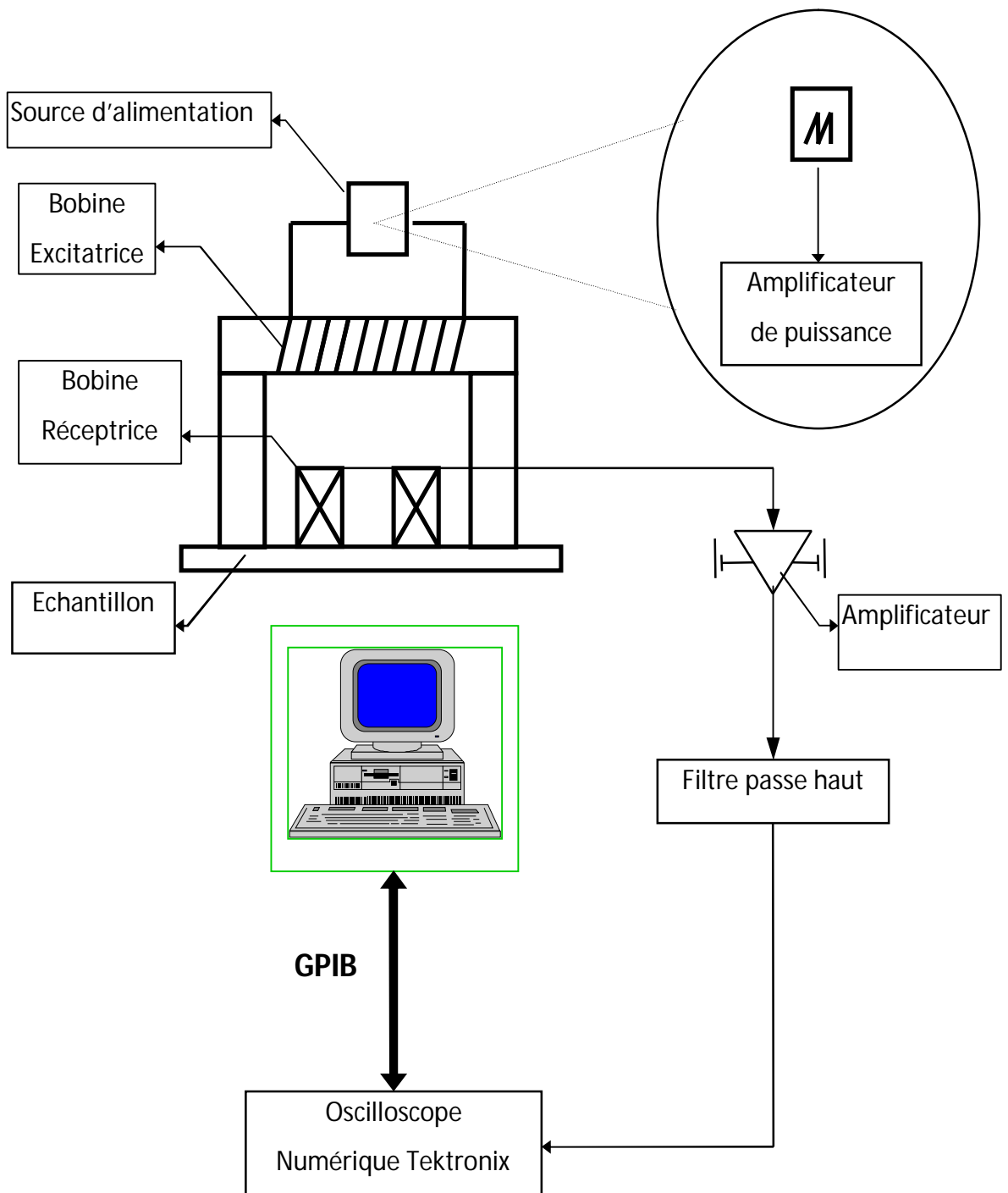


Figure 30. Systeme de mesure du bruit barkhausen [13].

4.3 ETUDE EXPERIMENTALE

Afin de vérifier les paramètres de notre réalisation et le programme permettant de numériser et de traiter les données, des tests ont été effectués sur des pièces de mêmes type et de mêmes dimensions mais ayant subies des modifications structurales différentes.

Nous avons effectué deux types de contrôles qui sont d'actualité dans le contrôle de qualité des matériaux, ces méthodes sont :

Le contrôle non destructif a savoir la caractérisation des défauts.

L'évaluation non destructive a savoir la caractérisation microstructurale des matériaux, les pièces ayant subies une cémentation suivi d'une trempe.

4.3.1 La cémentation :

La cémentation est un processus de diffusion de carbone dans un alliage ferreux solide. Cette opération est réalisée en chauffant le métal dans une atmosphère carbonée au-dessus de la température de transformation pendant un temps prédéterminé. Après la cémentation, les pièces sont trempées afin de durcir la couche de surface cémentée. Le noyau n'est pas affecté.

Il s'agit d'un processus de durcissement de surface largement utilisé avec les aciers à faible teneur en carbone. L'importance industrielle de la cémentation s'exprime dans sa part de marché, puisqu'un tiers de tous les traitements thermiques de durcissement sont réalisés par cémentation et durcissement.

La cémentation s'est effectuée en trois étapes. Les cycles thermiques correspondant au trois étapes sont représentés sur la figure 31.

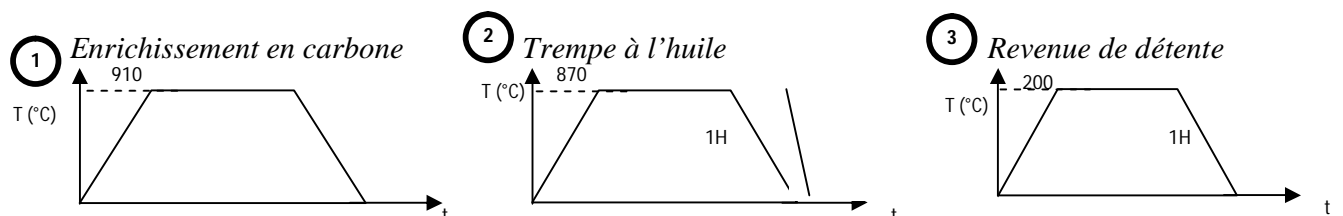


Figure 31. Représentation schématique des traitements effectués [9].

Un double traitement est requis pour la cémentation afin d'obtenir à la surface de l'acier une couche de 0.3 à 2 mm d'épaisseur à haute teneur en carbone.

Après introduction du carbone en surface, la surface cémentée subit un traitement thermique destiné à lui conférer ses propriétés d'emploi. Il s'agit généralement d'un durcissement par trempe, suivi d'un revenu de dimensionnement à des températures comprises le plus souvent entre 150 et 200 C°, afin de conserver à la couche une haute dureté.

4.3.2 Préparation des échantillons :

Les matériaux utilisés dans notre étude comme mentionné précédemment sont l'Acier 16NiCr6.

Nous avons choisi des aciers au nickel-chrome aptes à la cémentation, disponible et de compositions chimiques rapprochées en dehors de la teneur en carbone. Ce choix est justifié par l'utilisation importante de ces derniers dans l'industrie, en particulier dans la fabrication des pignons.

Nous disposons d'une barre cylindrique de diamètre 100 mm pour le 16NiCr6. Nous avons préparé quatre échantillons en découpant des rondelles de 10 mm d'épaisseurs. Trois échantillons ont subi le traitement de cémentation le quatrième sert de référence. Les échantillons ont été découpés à l'aide d'une guillotine électrique, et ont subi un polissage mécanique, afin d'éliminer les rugosités des surfaces susceptible d'influencer les résultats.

La cémentation a été réalisée au niveau de la S. N. V. I.

Avec des temps de maintien différents, à une température comprise entre 900 et 1000° C et dans une atmosphère carburante, nous avons obtenu trois différentes épaisseurs de couches cémentées [9].

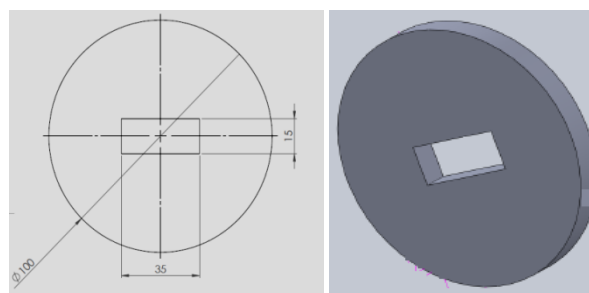


Figure 32. Schéma Pièces cémentées.

Référence de la pièce	Pièce 01 « référence »	Pièce 02	Pièce 03	Pièce 04
Temps de maintien (h)	0	8	10	14
Épaisseur de cémentation (μm)	0	836	888	1021

Tableau 2. Caractéristique des pièces cimentées.

4.3.3 Caractéristiques de pièces possédantes des défauts :

Les résultats obtenus par BN dépendent d'un certain nombre de paramètre, notamment les différents défauts que nous avons introduits. A cet effet nous avons choisi un acier de type XC48 à cause de sa disponibilité.

Nous avons voulu à fin de montrer la sensibilité de notre réalisation, utiliser des défauts très proche l'un de l'autre sur des échantillons de même dimension et de même structure qui sont illustrés ci-dessous Figure 33 :

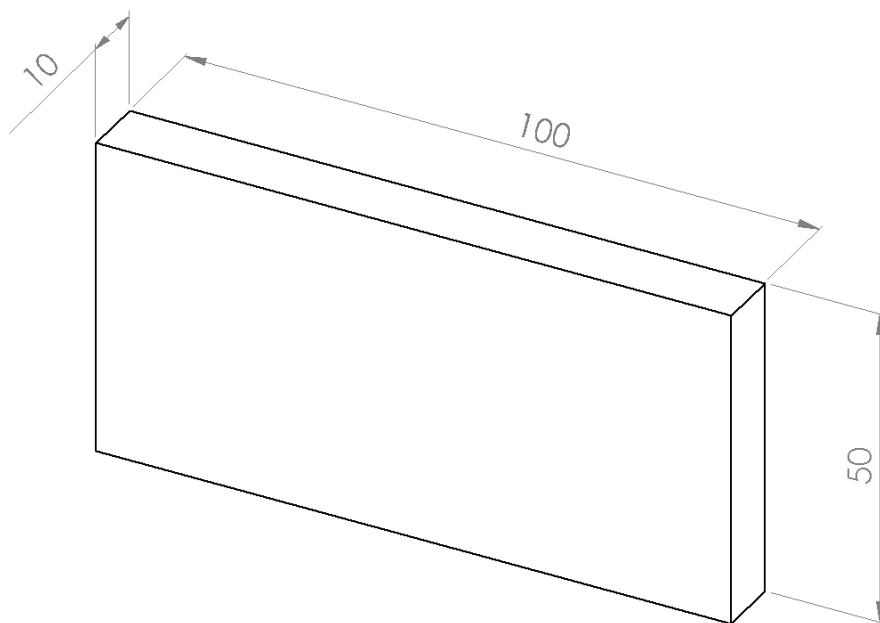


Figure 33. Schéma de la « Pièce05 ».

En contrôle non destructif et jusqu'à ce jour la caractérisation se fait par apport a un référentiel, dans notre cas la pièce de référence « **pièce 05** » est une pièce de même structure et de même dimension n'ayant subi aucun traitement

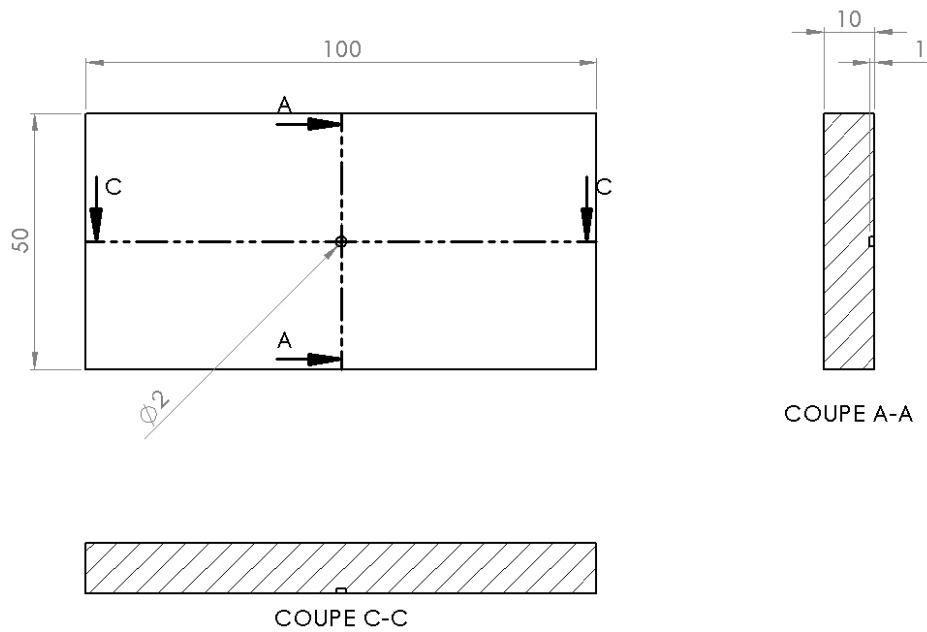


Figure 34. Schéma de la « Pièce06 ».

Pièce 06 : ACIER XC48 de dimension 100X50X10(mm³), et possédant une empreinte verticale de 1mm de profondeur.

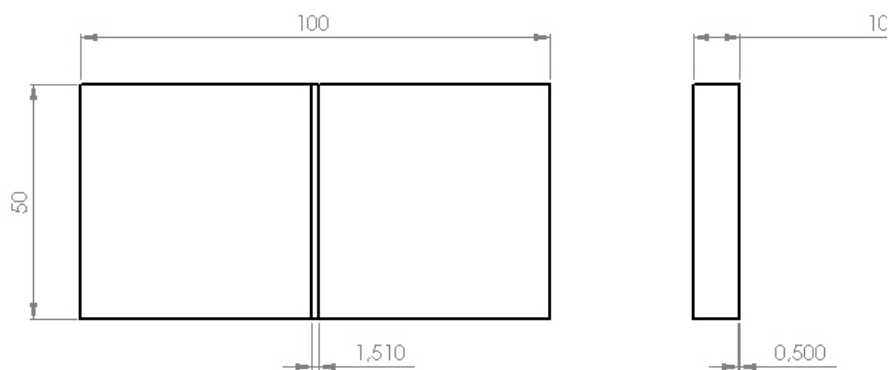


Figure 35. Schéma de la « Pièce0 7 ».

Pièce 07 : ACIER XC48 de dimension 100X50X10(mm³), et possédant une rainure superficielle de 0.5mm de profondeur.

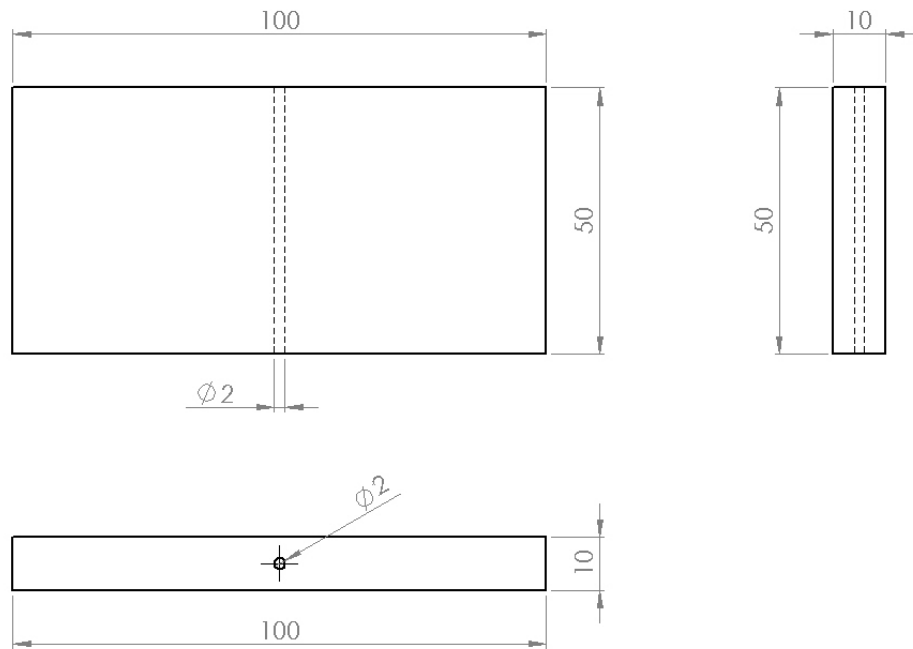


Figure 36. Schéma de la « Pièce08 ».

Pièce 08 : ACIER XC48 de dimension 100X50X10(mm³), avec un perçage horizontale de 2 mm de diamètre qui traverse la pièce de par-en-par

4.4 TRAITEMENT NUMERIQUE DU SIGNAL

4.4.1 Acquisition des signaux :

Avant de procéder à l'acquisition des signaux il est nécessaire de les numériser. Dans notre cas la numérisation et l'acquisition des signaux sont effectuées par un oscilloscope numérique programmable par l'intermédiaire d'une interface IEEE488, ou bien par un des enregistrements sur une disquette incorporée.

L'oscilloscope est un *TEKTRONIX7854*, qui permet un échantillonnage de signal sur un nombre de point réglable (128, 256,512et1024), et l'achemine vers un PC pour le traiter [14].

4.4.2 Echantillonnage :

Le traitement numérique des signaux consiste à obtenir des valeurs discrètes d'un signal continu traité par ordinateur. Cette opération est appelée « échantillonnage ». Afin d'avoir une suite de valeurs numériques régulière, les échantillons doivent être prélevés périodiquement avec une période Δt .

Si le signal à analyser n'évolue pas trop rapidement pour une cadence d'échantillonnage suffisamment élevée, il est possible de reconstruire l'image du signal original et ce en respectant la condition de **SHANON**. Cette condition traduit qu'un signal analogique ayant une largeur de bande de fréquence limitée à f_{\max} ne peut être reconstitué à partir de ses échantillons que si ceux-ci sont prélevés avec une fréquence d'échantillonnage $f_e = \frac{1}{\Delta t}$ supérieure ou égale à $2f_{\max}$ ($f_e \geq 2f_{\max}$) [14].

4.4.3 Transformée de Fourier :

L'analyse de Fourier permet de faire ressortir le contenu fréquentiel d'un signal temporel. L'opération « technique » associée à ladite analyse est appelée « Transformée de Fourier ». Son application inverse permet le retour vers sa représentation temporelle.

Les transformée directe et inverse sont notées respectivement **TF** et **TFI**.

4.4.4 Transformation de Hilbert (TH) :

a. *Definition*

Soit un signal réel $x(t)$ ayant comme transformée de Fourier la fonction $X(f)$.

Vu la symétrie Hertzienne : $X(f) = X(-f)$, c'est-à-dire que $X_{\text{ré}}(f)$ est une fonction paire et $X_{\text{im}}(f)$ est une fonction impaire. Les fréquences négatives peuvent être reconstruites de façon très simple à partir des fréquences positives.

Elles n'apportent donc aucune information nouvelle sur le signal $x(t)$ [15].

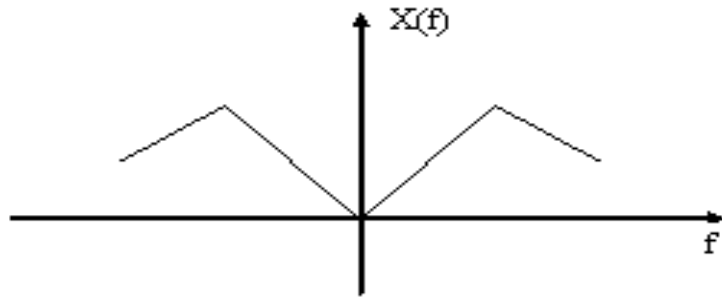


Figure 37. Transformée de Hilbert du signal $x(t)$ [15].

On définit le signal $y(t)$ comme étant la transformée de Hilbert du signal $x(t)$ noté : $y(t) = TH\{x(t)\}$ comme étant le signal en quadrature de $x(t)$; il est obtenu après le passage par le filtre de quadrature dont la fonction de transfert est $h_0(t) = 1/\pi t$.

Le signal $y(t)$ est obtenu grâce à l'égalité suivante :

$$y(t) = x(t) * h_0(t) \dots\dots\dots(1)$$

Avec :

$$x(t) * h_0(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot h_0(t - \tau) d\tau \dots\dots\dots(2)$$

Afin de simplifier les calculs, le passage à l'échelle fréquentielle s'avère intéressant.

La fonction $h_0(t)$ a comme transformé de Fourier la fonction $H(f)$ telle que :

$$TF\{h_0(t)\} = H_0(f) = -jSgr(f) \dots\dots\dots(3)$$

b. Utilisation de la transformée de Hilbert dans la détection d'enveloppe

Il existe une méthode analytique pour la détection de l'enveloppe d'un signal $x(t)$ sans l'utilisation d'un filtre RC mais on utilise la TH. L'obtention de l'enveloppe du signal $x(t)$ se fait après le calcul du signal analytique $z(t)$.

Nous remarquons par la suite que $|z(t)|$ reproduit fidèlement l'enveloppe du signal $x(t)$. L'intérêt est de déterminer le taux d'atténuation du signal.

4.4.5 Fenêtres temporelles :

L'opération d'enregistrement en temps réel ou différé d'un signal se fait généralement sur une durée temporelle finie. Cette durée peut être associée analytiquement à une fenêtre dite temporelle ayant la forme rectangulaire. En effet, on montre que l'analyse d'un signal de durée finie est équivalente à une opération de multiplication d'un signal temporel de durée infinie avec une fenêtre ou porte de durée finie. Les types de fenêtre connues répondent à des architectures rectangulaire, triangulaire, parabolique, polynomiale, cosinusoidale ou des fonctions particulière telle que Blackman, Hamming, Hanning ou de Kaiser [15].

4.4.6 La représentation temps – fréquence :

La représentation temps- fréquence est une représentation qui permet d'avoir la durée d'une « information » contenue dans le signal temporel en fonction de sa fréquence (ou raie) associée [14].

4.5 L'INTERFACE GRAPHIQUE

Après avoir numérisé le bruit de Barkhausen, une interface graphique a été développée pour faire le traitement nécessaire des signaux acquis, cette dernière nous permet d'effectuer les traitements suivants :

- a. Le calcul de la FFT
- b. Le calcul de la densité spectrale
- c. La détection d'enveloppe
- d. La représentation temps fréquence
- e. L'histogramme
- f. L'auto corrélation
- g. Le tracé du cycle d'hystérésis

Notre interface présente une structure arborescente qui offre à l'utilisateur un suivi assez correct des applications effectuée et une meilleure représentation de ses données.

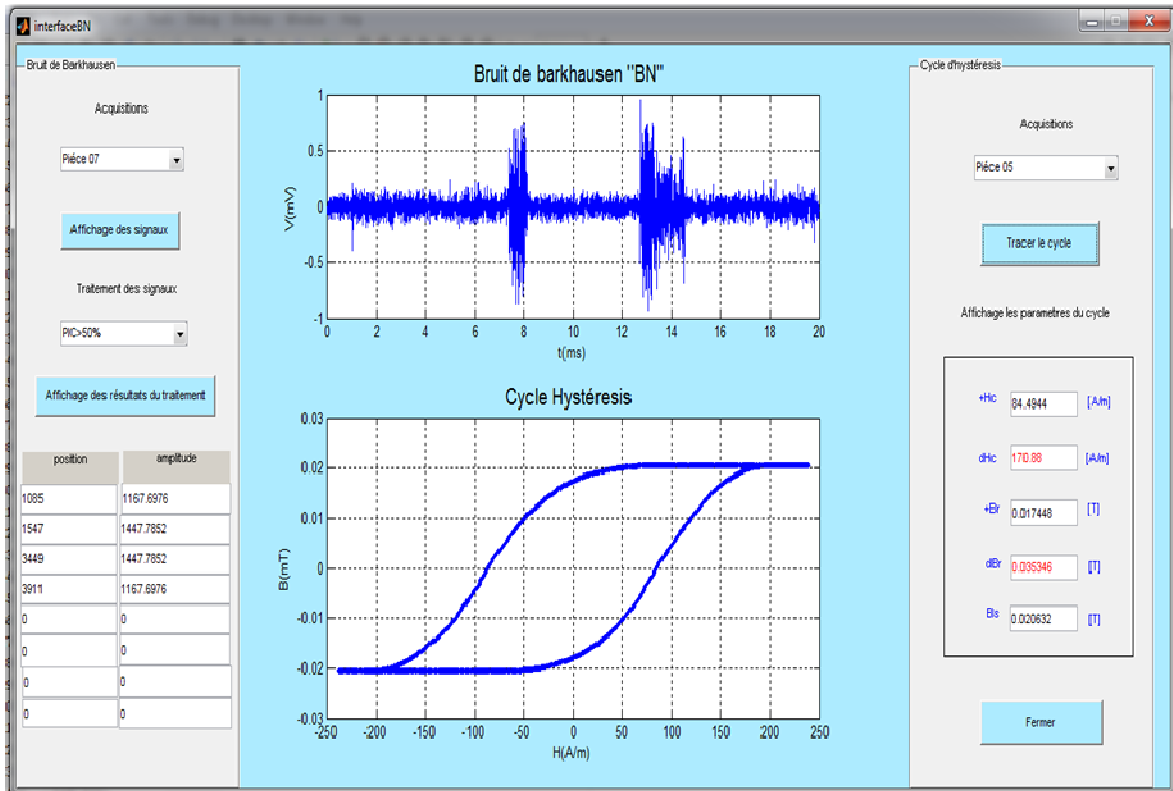


Figure 38. L'interface de simulation et traitement.

Le lancement de l'application fait à partir de l'éditeur du MATLAB.

Dans cette interface on peut entrer tous les paramètres des signaux.

Les résultats de chaque méthode sont donnés par leur bouton correspondant.

4.6 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les résultats obtenus par l'application de notre chaine de mesure ainsi que les différents traitements sont présentés de la manière suivante :

- Le signal du bruit de barkhausen.
- Les pics de transformer de fourrier rapide (FFT) > 50%.
- La transformation temps- fréquence (T- F).
- Enveloppe du signal.
- Histogramme du signal.
- Le cycle d'hystérésis.

Les résultats obtenus après traitement sont les suivantes :

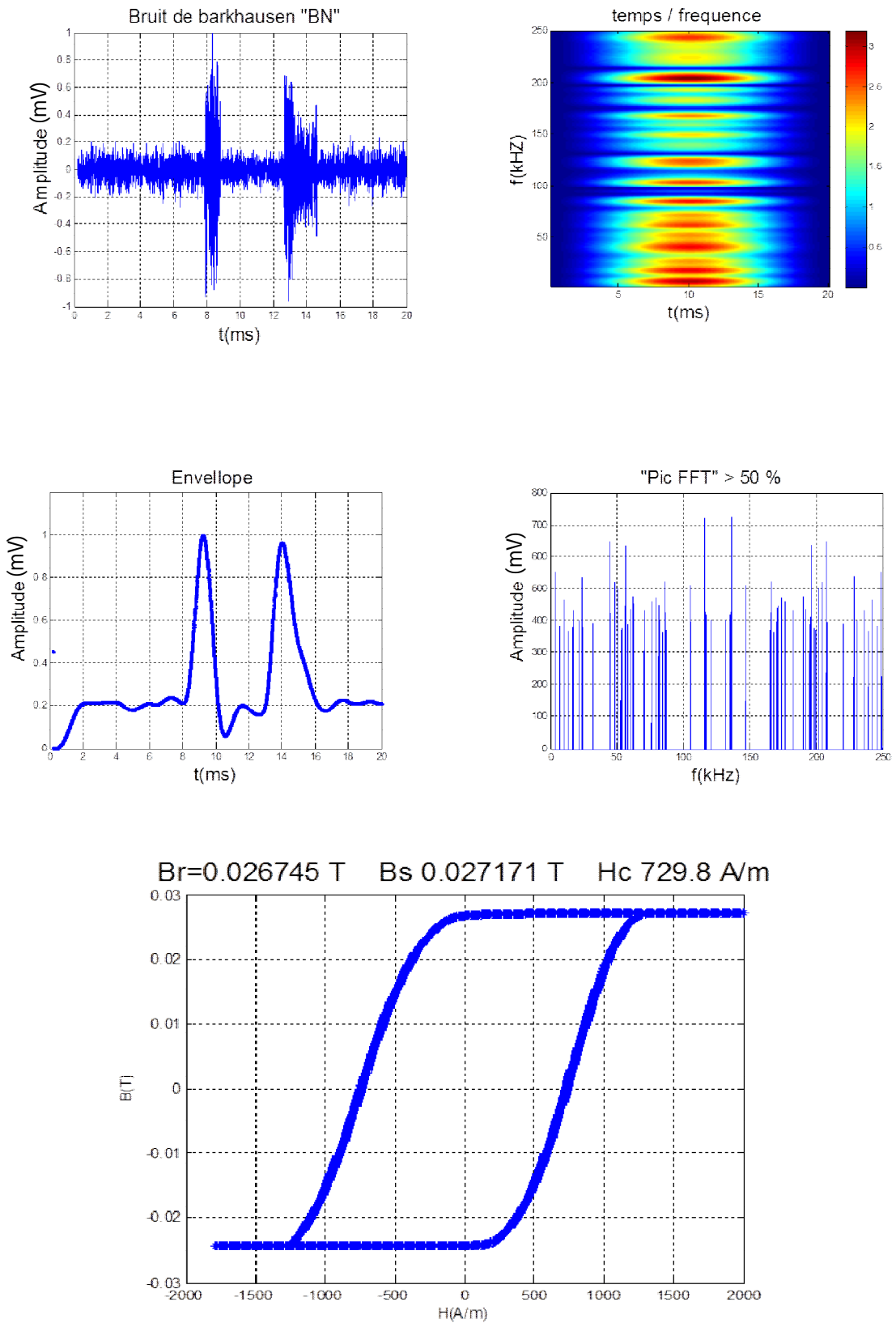


Figure 39. Résultats « pièce 01 » obtenus par les différents traitements.

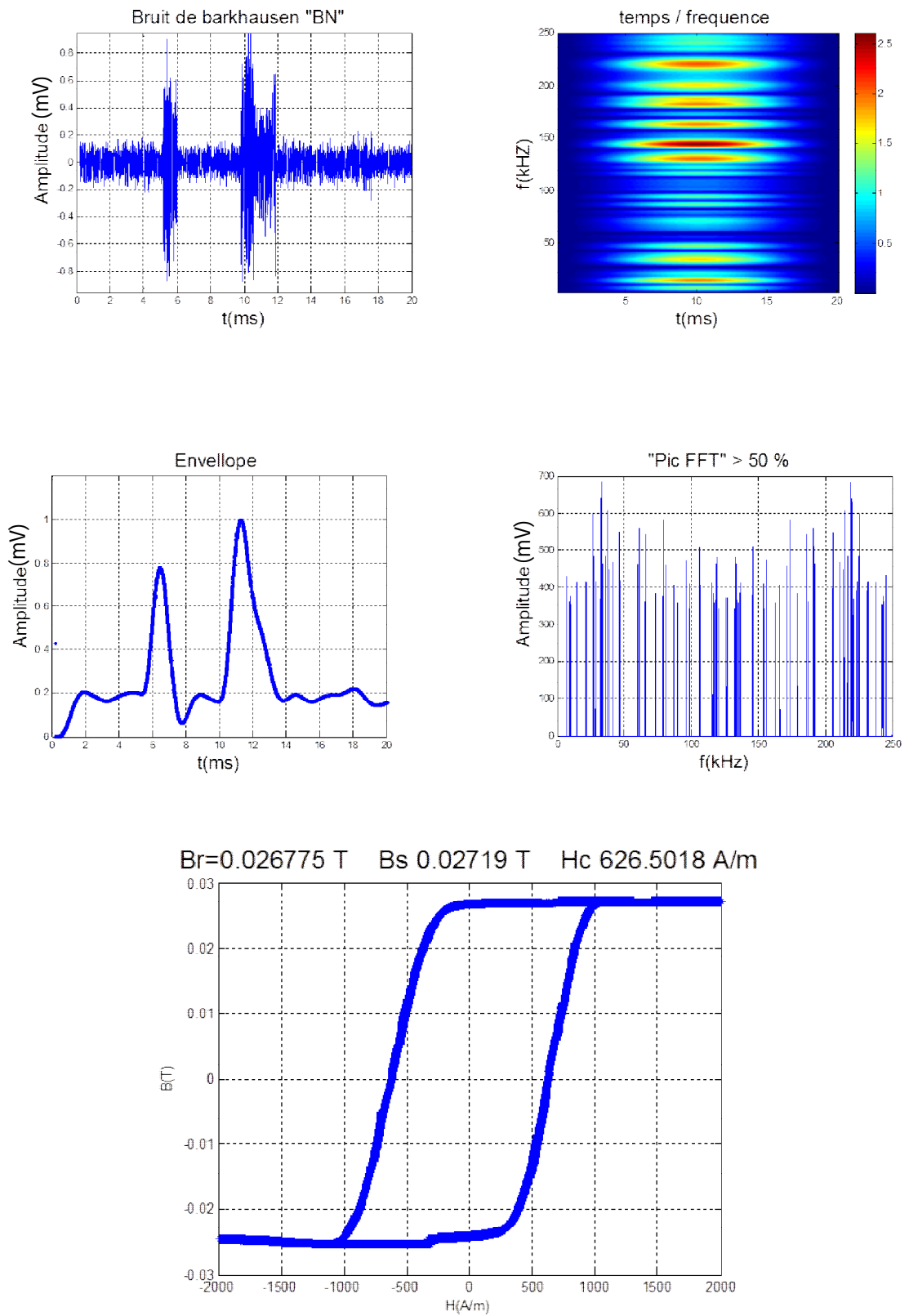


Figure 40. Résultats « pièce 02 » obtenus par les différents traitements.

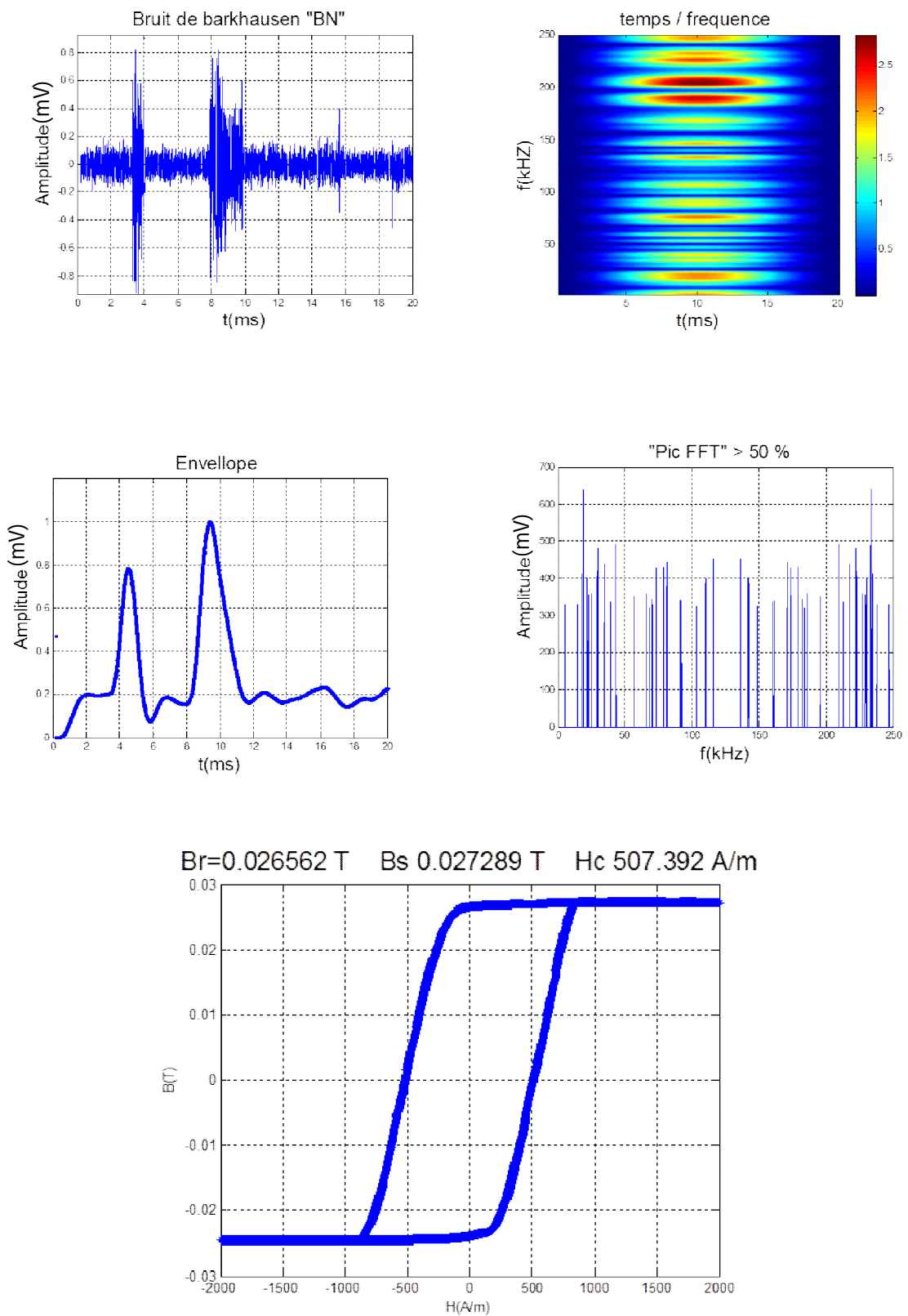


Figure 41. Résultats « pièce 03 » obtenus par les différents traitements.

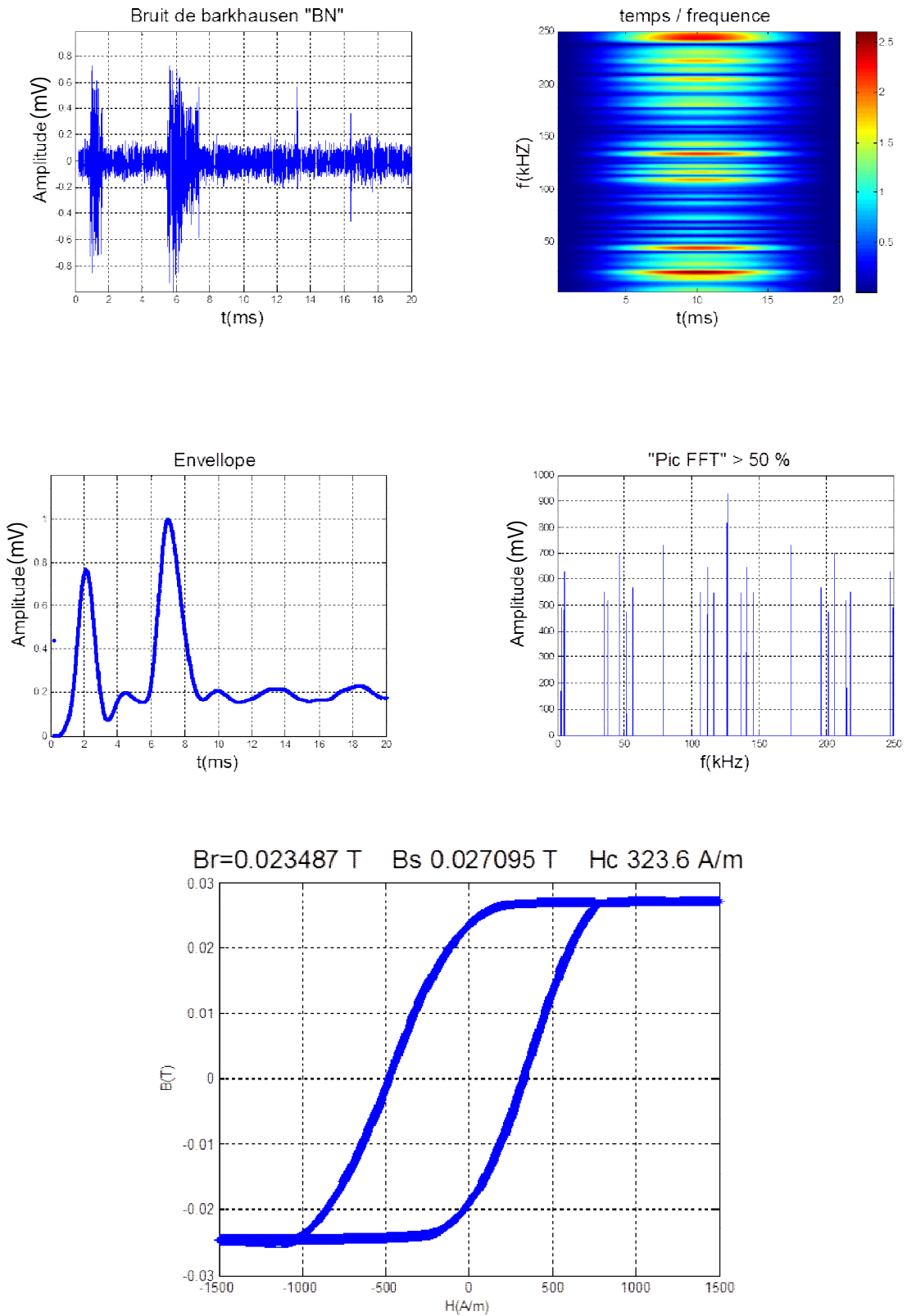


Figure 42. Résultats « pièce 04 » obtenus par les différents traitements.

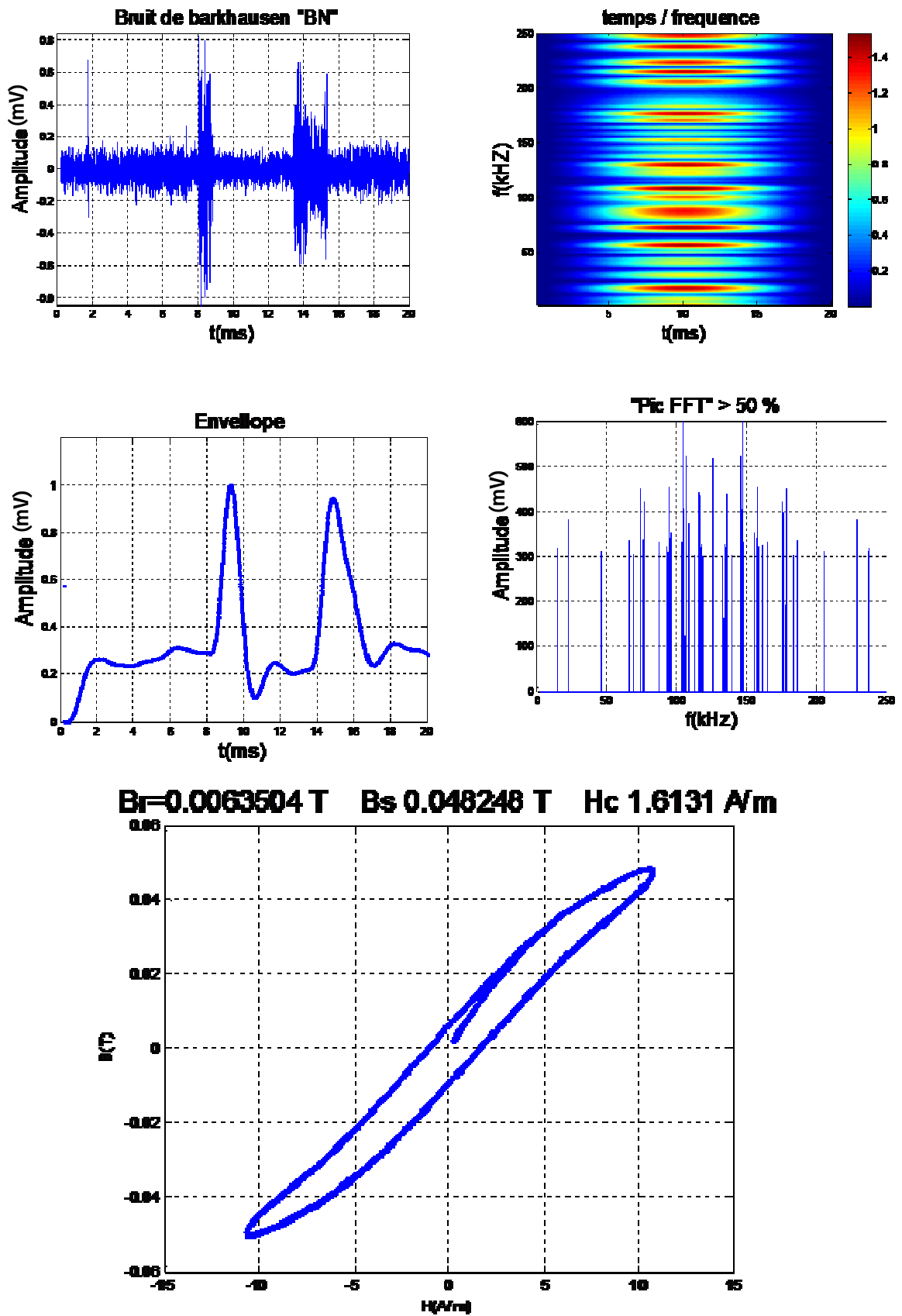


Figure 43. Résultats « pièce 05 » obtenus par les différents traitements.

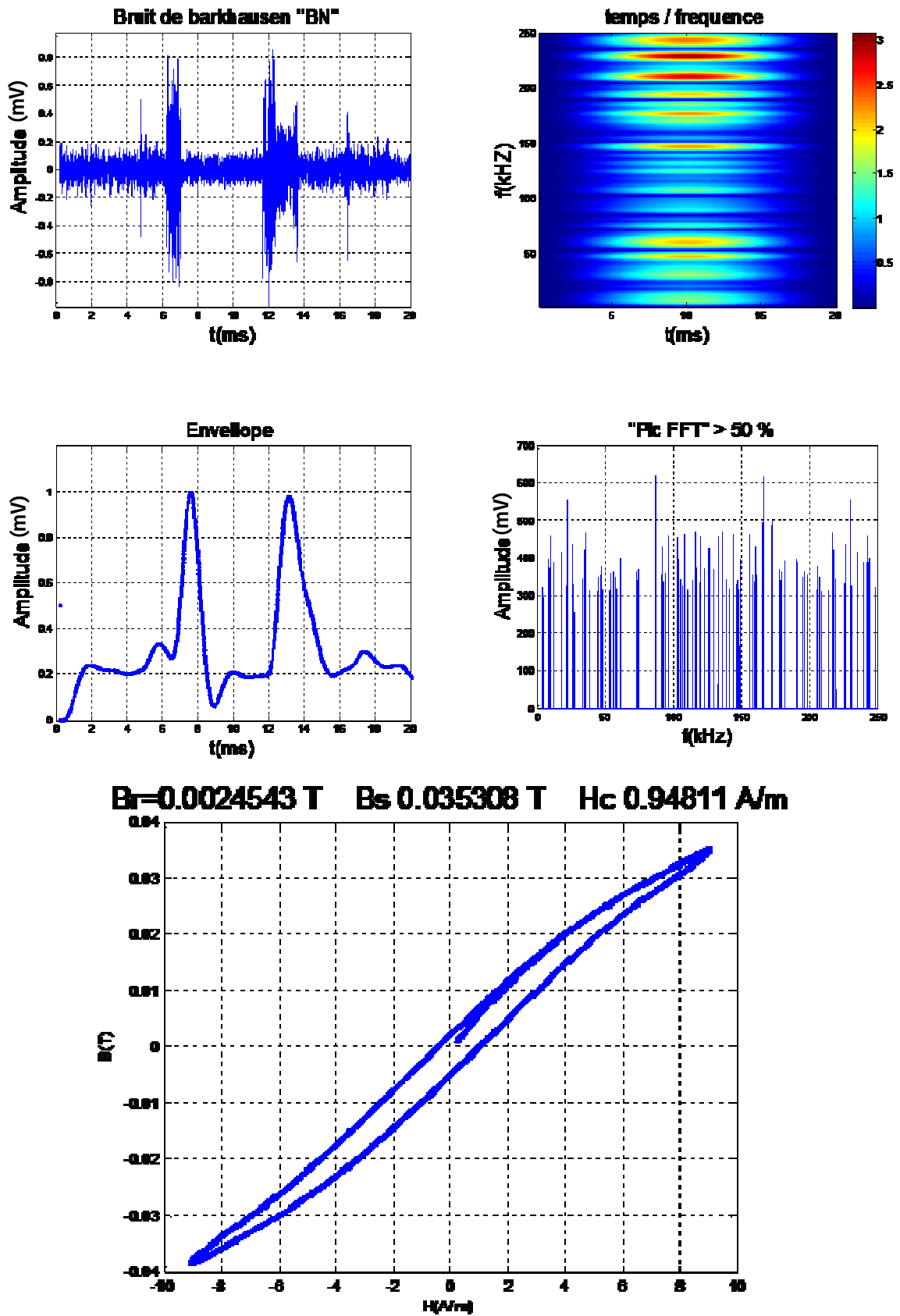


Figure 44. Résultats « pièce 06 » obtenus par les différents traitements.

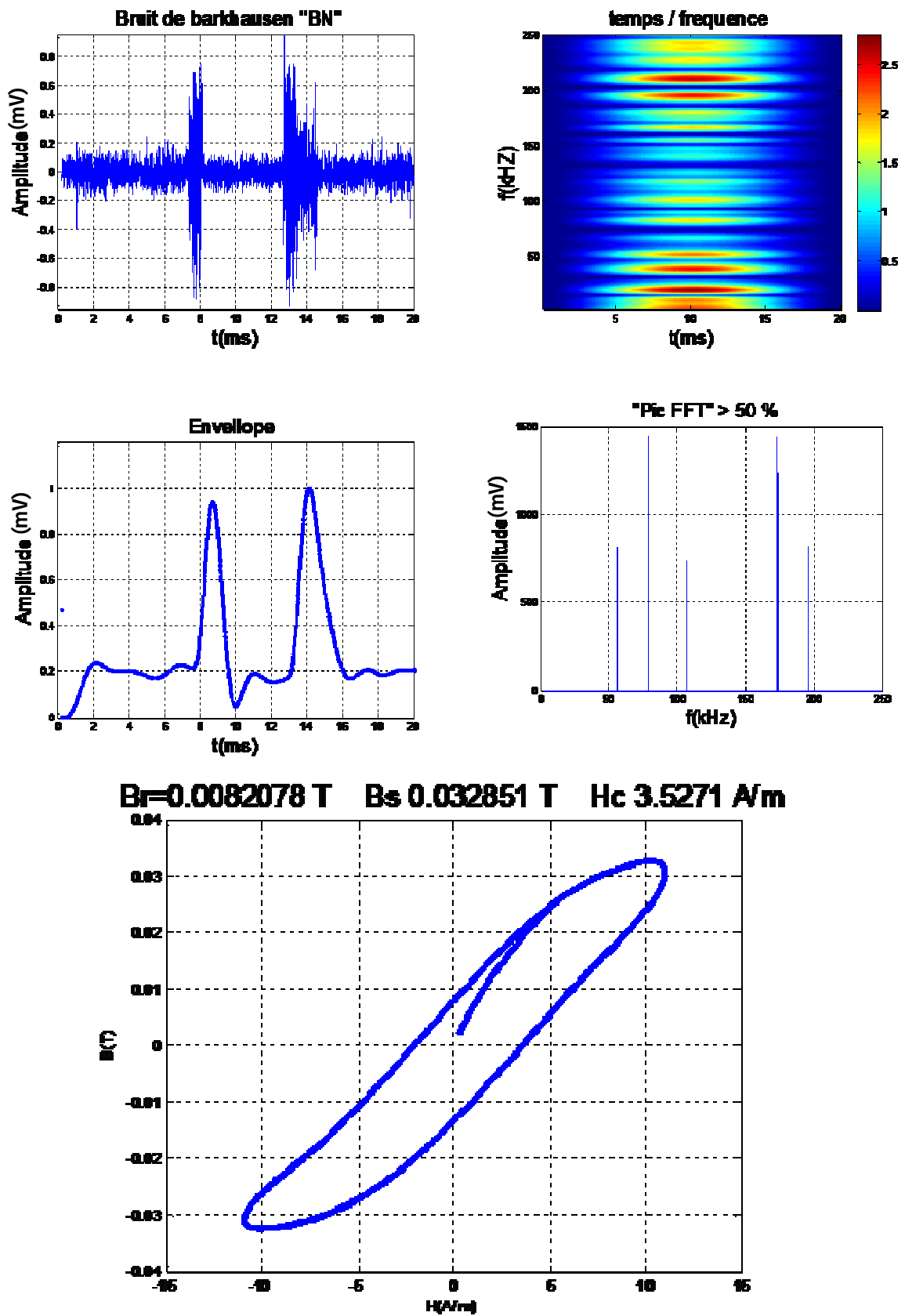
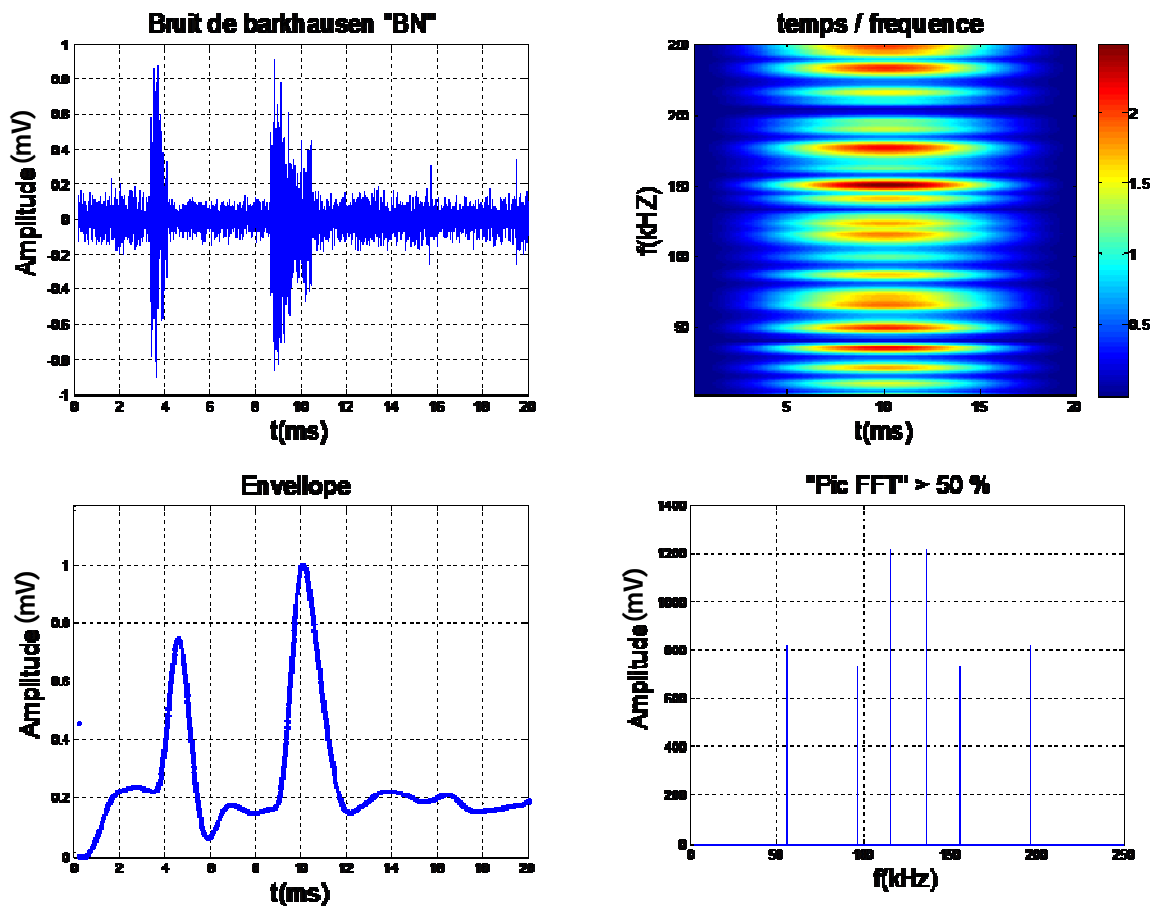


Figure 45. Résultats « pièce 07 » obtenus par les différents traitements.



$B_r=0.0077887$ T B_s 0.055091 T H_c 1.9349 A/m

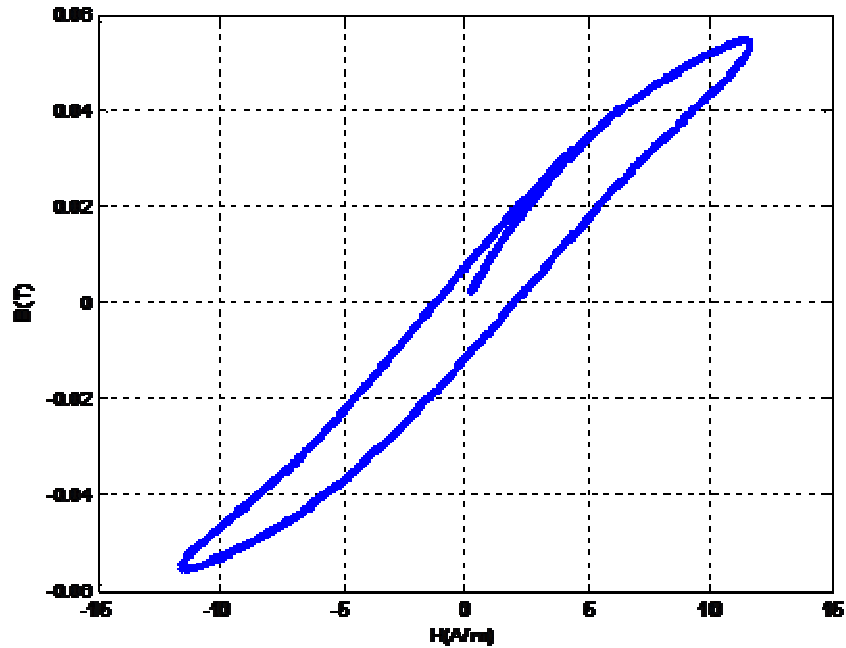


Figure 46. Résultats « pièce 08 » obtenus par les différents traitements.

4.7 ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Les résultats trouvés montrent que la réalisation faite ainsi que le soft développé permet de traiter les différentes caractéristiques de contrôle non destructif du matériau et d'aider dans le diagnostic final sur l'évaluation du défaut de l'échantillon étudié.

Les résultats sont obtenus grâce à la chaîne de mesure de barkhausen et au développement du programme élaboré.

A partir de l'acquisition de bruit de barkhausen et cycle d'hystérésis nous pouvons déterminer :

a. FFT et DSP

Qui permettent d'évaluer le nombre de pics >50% et leurs positions ainsi que leur amplitude.

b. L'enveloppe du signal

Qui permettent de déterminer le nombre de pics ainsi que leurs amplitudes.

c. La transformation temps- fréquence

Elle permet de déterminer les fréquences qui correspondent à un maximum d'énergie dans le signal.

d. Cycle d'hystérésis

Grâce à ce dernier on peut déterminer les caractéristiques suivantes des matériaux : le champ coercitif (H_c), l'induction rémanente (B_r), et l'induction de saturation (B_s).

4.7.1 Analyse par enveloppe :

L'analyse par enveloppe se fait par rapport à la partie positive du signal car on remarque qu'il y a une symétrie par rapport à l'axe de temps.

Dans le cas de l'enveloppe et en CND on s'intéresse à la forme de l'enveloppe et en particulier au décalage du pic.

La répétition des résultats est obtenue. De plus l'amplitude et le nombre de sauts sont différents suivant le traitement métallurgique élaboré.

Les résultats obtenus sont importants, ils permettent d'interpréter un état de la pièce à contrôler, l'amplitude et les sauts sont différents suivant la nature et la dimension du défaut.

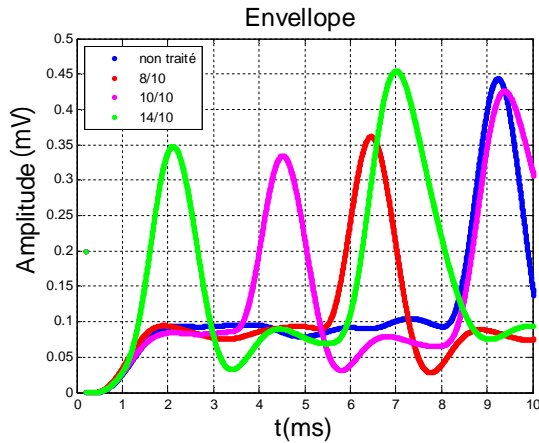


Figure 47. Effet de la cimentation sur enveloppe

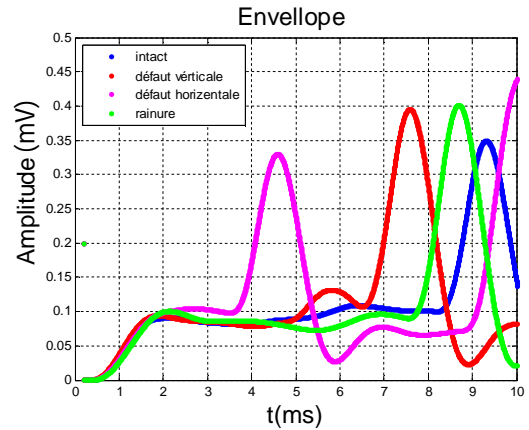


Figure 48. Effet de défaut sur enveloppe

Pour la pièce cimentée, nous remarquons que les amplitudes diffèrent selon le temps de maintien et donc suivant la nouvelle configuration microstructurale.

Remarquons que la présence de défaut provoque l'augmentation de l'amplitude du pic.

4.7.2 Analyse par FFT et la DSP :

Les résultats obtenus sont satisfaisants dans le sens que la répétitivité des résultats aussi les amplitudes obtenus par FFT et DSP sont différentes suivant les traitements effectués.

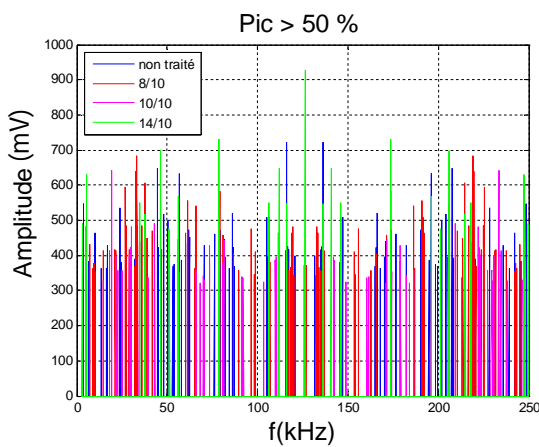


Figure 49. Effet cimentation sur le PIC FFT.

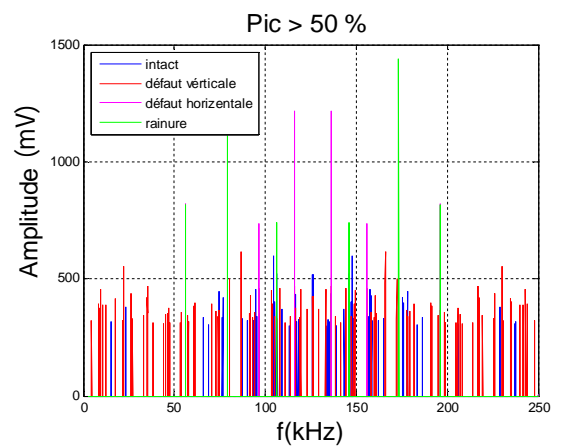


Figure 50. Effet défaut sur le PIC FFT.

L'étude des amplitudes donne énormément d'information sur le caractère microstructurale du matériau.

De ces diagrammes nous déduisons les variations des FFT et DSP maximales relatives aux nuances étudiées en fonction du temps.

Remarquons que la présence d'un défaut provoque l'augmentation de l'amplitude obtenue par FFT et DSP.

Pour la cémentation, on remarque que les amplitudes diminuent avec l'augmentation de temps de maintien.

Le bruit Barkhausen contient beaucoup d'information cela dépend du niveau de traitement voulu. Pour la caractérisation microstructurale la FFT et DSP permettent de déterminer l'état du matériau.

Pour pousser l'étude métallurgique, nous avons réalisé d'autre moyenne de traitement numérique. En effet la caractérisation nano structurale nécessite des traitements plus poussés de façon à extraire l'information utile.

4.7.3 Analyse par transformation temps- fréquence :

Les résultats obtenus par cette méthode permettent de déterminer les fréquences correspondantes à des amplitudes déterminées.

Nous remarquons que les résultats sont différents suivants les traitements effectués ce qui montrent que les signaux obtenue sont différents en fonction de la modification microstructurale.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'analyser la réponse micro structurelles du matériau.

4.7.4 Analyse par Cycle d'hystérésis :

Concernant les résultats obtenus par le cycle d'hystérésis elles sont intéressantes, et sont influençable par le traitement subit et elles sont reproductible, pour chaque échantillon nous avons réalisé plusieurs tests et les courbes obtenus étaient différentes

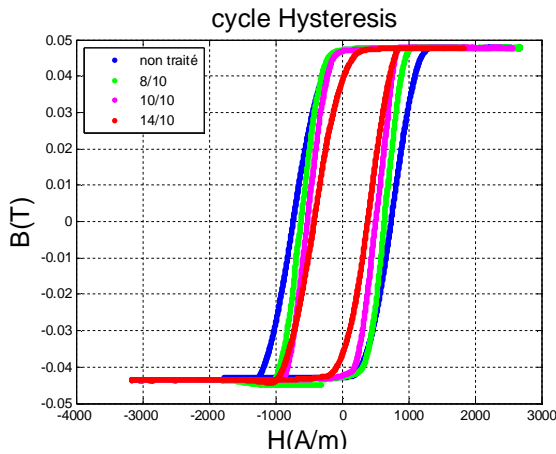


Figure 51. Effet de cémentation sur le cycle.

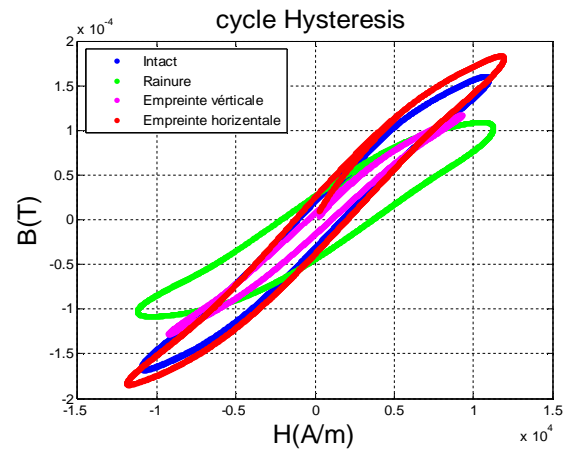


Figure 52. Effet de défaut sur le cycle.

Nous remarquons également que la forme du cycle d'hystérésis change d'une nuance à une autre, les modifications apportées à la microstructure expliquent cette variation des paramètres essentiels : champ coercitif (H_c), l'induction rémanente (B_r), et l'induction de saturation (B_s).

Les résultats obtenus à travers nos acquisitions montrent que les signaux correspondant au cycle d'hystérésis pour chaque type de traitement (cémentation, défauts) sont différents. Cela montre que cette étude présente des résultats satisfaisants.

D'après les cycles tracés nous remarquons que l'effet de cémentation joue principalement sur l'amplitude, la position et l'élargissement du cycle, Tendance à ce que le matériau devienne plus doux. Et la présence de défauts provoque la déformation de ce dernier.

Les pièces ayant subi des traitements leurs cycles sont différents comparativement à la référentielle.

4.8 CONCLUSION

Les différents programmes de traitement du signal développés (FFT, DSP, temps – fréquence, enveloppe du signal et cycle d'hystérésis) permettent la caractérisation de l'état métallurgique de la pièce étudiée ainsi que sa classification.

La chaîne de contrôle (BN) est très sensible aux différents paramètres qui interviennent lors d'un contrôle. Les résultats obtenus sont intéressants et prometteurs.

Conclusion générale

Le contrôle par les méthodes électromagnétiques tient une place importante dans la résolution des problèmes de caractérisation des matériaux. Ces méthodes sont très demandées dans l'industrie grâce aux gains économiques et temporels qu'elles nous apportent.

Le contrôle non destructif par procédés magnétiques tel que le bruit de Barkhausen permet de caractériser les propriétés métallurgiques des matériaux et de constater aussi que le BN est la conséquence d'un phénomène physique propre aux matériaux ferromagnétique.

La recherche bibliographique que nous avons effectuée nous a permis d'une part de comprendre la technique de contrôle par le bruit de BN et les phénomènes régis par le cycle d'hystérésis utilisés en particulier en CND, d'autre part, de procéder à une ébauche sur les différents système d'acquisition et de traitement permettant de faciliter l'acquisitions et l'interprétation des résultats. Une étude sur les différents capteurs utilisés dans la technique du BN a été effectuée.

Une étude théorique et expérimentale correspondant à la réalisation de la chaîne de mesure ainsi que sa mise en forme a été menée. Le système réalisé nous a donné des résultats satisfaisants que ce soit pour les signaux de BN acquis ou pour la courbe d'hystérésis.

La chaîne de mesure que nous avons réalisée est très sensible aux différents paramètres qui interviennent lors d'un contrôle. Il est nécessaire de préparer très soigneusement le banc de mesure pour ne capturer que le signal utile. De nombreux signaux dus à de nombreux paramètres sont susceptibles d'intervenir sur la qualité de l'information comme le bruit électronique, la présence de champs externe,...

Les résultats obtenus par notre chaîne de mesure et par les différents traitements permettent de mettre en évidence sa sensibilité. En effet nous avons pu par cette

chaîne mettre en évidence la détection de défauts par la technique BN qui n'est pas destinée au contrôle par « CND » mais plus pour l'Évaluation Non Destructive « NDE »

Il convient de noter que l'amplitude du signal Barkhausen n'est pas le seul paramètre représentatif de l'évolution de la microstructure. Des études sont en cours pour extraire le maximum d'information du signal par l'utilisation d'autres outils de traitement plus performants et plus adaptés (SSP, GA, Réseaux de neurones ...) pour suivre efficacement l'évolution de la microstructure.

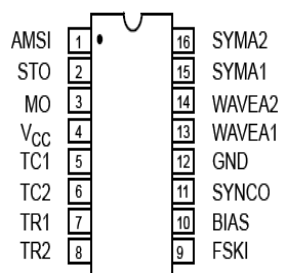
Certaines améliorations expérimentales sont envisagées :

1. Optimisation des performances du matériel électronique utilisé (composants, capteurs, l'oscilloscope... etc.), le choix de ces éléments doit s'adapter aux exigences de la technique.
2. Réalisation d'un dispositif destiné à une utilisation industrielle.

Annexe (1)

Nomenclature et caractéristiques des Composants utilisés.

❖ -XR 2206 :

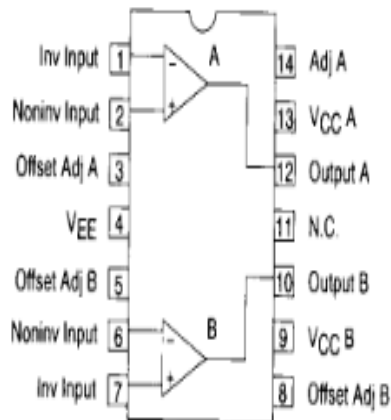


Descriptions des pins :

Pin #	Symbol	Type	Description
1	AMSI	I	Amplitude Modulating Signal Input.
2	STO	O	Sine or Triangle Wave Output.
3	MO	O	Multiplier Output.
4	V _{cc}		Positive Power Supply.
5	TC1	I	Timing Capacitor Input.
6	TC2	I	Timing Capacitor Input.
7	TR1	O	Timing Resistor 1 Output.
8	TR2	O	Timing Resistor 2 Output.
9	FSKI	I	Frequency Shift Keying Input.
10	BIAS	O	Internal Voltage Reference.
11	SYNCO	O	Sync Output. This output is a open collector and needs a pull up resistor to V _{CC} .
12	GND		Ground pin.
13	WAVEA1	I	Wave Form Adjust Input 1.
14	WAVEA2	I	Wave Form Adjust Input 2.
15	SYMA1	I	Wave Symetry Adjust 1.
16	SYMA2	I	Wave Symetry Adjust 2.

Caractéristiques électriques :

	Min	Max
Alimentation V	10	26
Courant mA		20
Tension de sortie V	4	6
Stabilité d'Amplitude <u>dB</u>	0.5	0.5



❖ **MC1 747 :**

Caractéristiques électriques :

	Min	Max
Alimentation V	22±	22±
Tension de sortie V	10±	10±
Courant de sortie mA	10	35

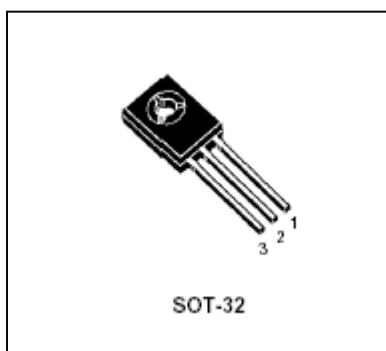
❖ **μA 741**



Caractéristiques électriques :

	Min	Max
Alimentation V	15±	15±
Tension de sortie V	20±	20±
Courant de sortie mA	10	35

❖ **BD135, BD136 :**

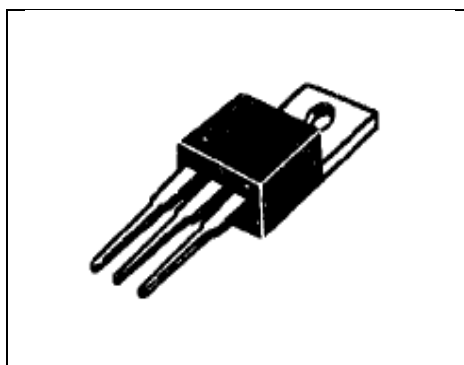


- 1-la base
- 2-le collecteur
- 3-l'émetteur

Caractéristiques électriques:

type		Vcemax (v)	Icmax (A)	h _{fe}
BD135	NPN	45	1	40-100
BD136	PNP	45	1	40-200

❖ **BD243, BD244 :**



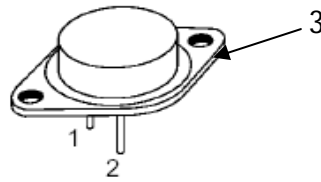
- 1-la base.
- 2-le collecteur.
- 3-l'émetteur.

Caractéristiques électriques:

type		Vcemax (v)	Icmax (A)	h _{fe} (MHz)
BD243	NPN	45	6	1-3
BD244	PNP	45	6	1-3

❖ **2N 5883 / BD316**

- 1- Base.
- 2-Emetteur.
- 3-Collecteur



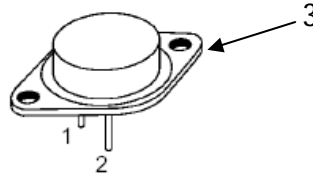
TO-3

Caractéristiques électriques:

Rating	Symbol	2N5883 2N5885	2N5884 2N5886	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	60	80	Vdc
Collector-Base Voltage	V_{CB}	60	80	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EB}	5.0		Vdc
Collector Current — Continuous Peak	I_C	25 50		Adc
Base Current	I_B	7.5		Adc
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	200 1.15		Watts W/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-65 to +200		°C

❖ **2N3055**

- 1. Base.
- 2. Emetteur.
- 3. Collecteur



TO-3

Caractéristiques électriques:

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{CBO}	Collector-Base Voltage ($I_E = 0$)	100	V
V_{CER}	Collector-Emitter Voltage ($R_{BE} = 100\Omega$)	70	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage ($I_B = 0$)	60	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage ($I_C = 0$)	7	V
I_C	Collector Current	15	A
I_B	Base Current	7	A
P_{tot}	Total Dissipation at $T_c \leq 25^\circ\text{C}$	115	W
T_{stg}	Storage Temperature	-65 to 200	°C
T_J	Max. Operating Junction Temperature	200	°C

Annexe (2)

Etude théorique de différents étages de la chaîne de mesure

1. Amplificateur de puissance :

1.1 caractéristiques des transistors utilisés :

T1, T4: BD 135 (NPN), BD136(PNP).

T2, T5 : BD 243 (NPN), BD244(PNP).

T3, T6 :2N3055 (NPN), BD 316(PNP).

1.2 Principe de fonctionnement :

Lorsque $V_e > 0$: T3 conduit, T6 bloqué, sachant que T3 est monté en collecteur commun alors :

$$G_v = 1 \Leftrightarrow V_e = V_s, \text{ si } V_e = V_{cc} \Leftrightarrow V_s = V_{cc}$$

Lorsque $V_e < 0$: T6 conduit, T3 bloqué, sachant que T6 est monté en collecteur commun donc :

$$G_v = 1 \Leftrightarrow V_e = V_s, \text{ si } V_e = -V_{cc} \Leftrightarrow V_s = -V_{cc}$$

Lorsque $-V_{be} < V_e < V_{be}$: T3 et T6 sont bloqués et $V_s = 0$.

2. Détermination des caractéristiques du bobinage

On a:

$$a = 1\text{cm}$$

$$b = 2\text{cm}$$

$L_1 = 6\text{ cm}$ la longueur de l'inducteur.

$L_2 =$ la longueur moyenne de la pièce a contrôler.

$$S = 2 a b = 2 \cdot 2 = 4\text{cm}^2$$

D'après la formule de MAXWELL :

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} S$$

D'où

$$B = \sqrt{2\mu_0} \sqrt{\frac{F}{S}} \Rightarrow B = 15 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{F}{S}}$$

AN: $B = 0.56 \text{ T}$

Calcul du nombre de spires

$N I_{\text{iff}} = H L$ (1) avec $L = 2L_1 + 2L_2 = 22 \text{ cm}$

$$I_{\text{iff}} = \frac{\text{Im } ax}{\sqrt{3}} = 1.73 \text{ A}$$

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (2)$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} \quad (3)$$

Remplacer (3) dans (1) $N I_{\text{iff}} = \frac{LB}{\mu_0 \mu_r}$

$$N = \frac{LB}{I_{\text{iff}} \mu_0 \mu_r}$$

μ_r : La perméabilité relative du matériau

AN : $N_f = 121 \text{ spires}$.

NB : cet électroaimant est utilisé pour magnétiser des pièces de petites tailles, mais dans le cas général on utilise un électroaimant plus sensible.

Calcul du diamètre de fil

Soit S_f la section du fil

$$S_f = \rho \frac{L_{\text{spire}}}{R} N$$

ρ : La résistivité du matériau ($\rho = 1,7 \cdot 10^{-7} \Omega$).

L_{spire} : la longueur d'une spire = $13 \cdot 10^{-2} \text{ m}$.

R : la résistance de l'électroaimant : $R = \frac{V}{I} = 3 \Omega$

AN : $S_f = 3.68 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$

Soit D_f le diamètre du fil

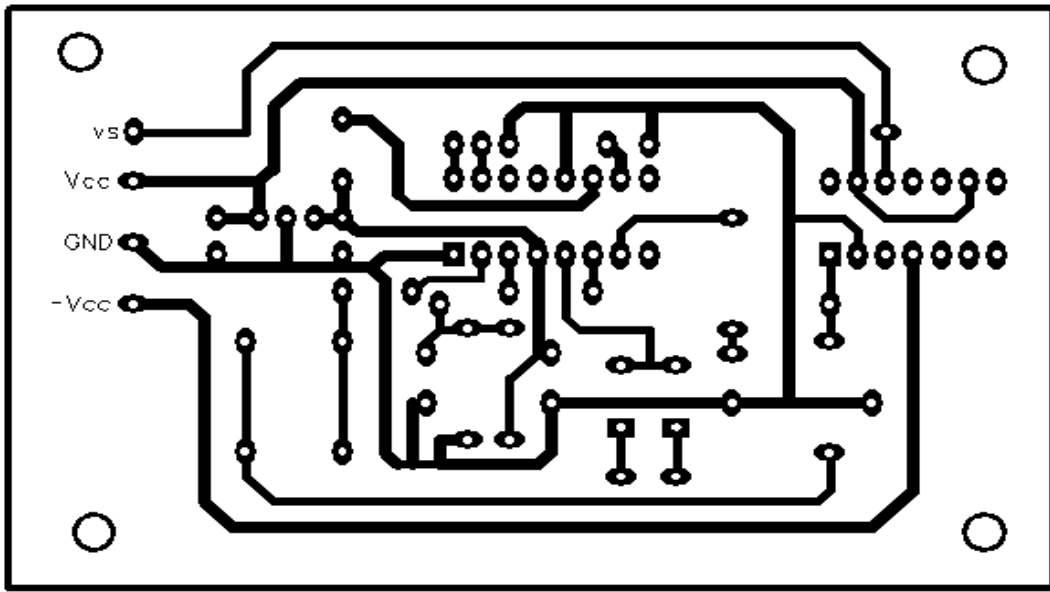
$$S_f = \frac{\pi D_f^2}{4} \Rightarrow D_f = \sqrt{\frac{4 S_f}{\pi}}$$

AN : $D_f = 0.68 \text{ mm}$ on prend une valeur normalisée $D_f = 0.7 \text{ mm}$.

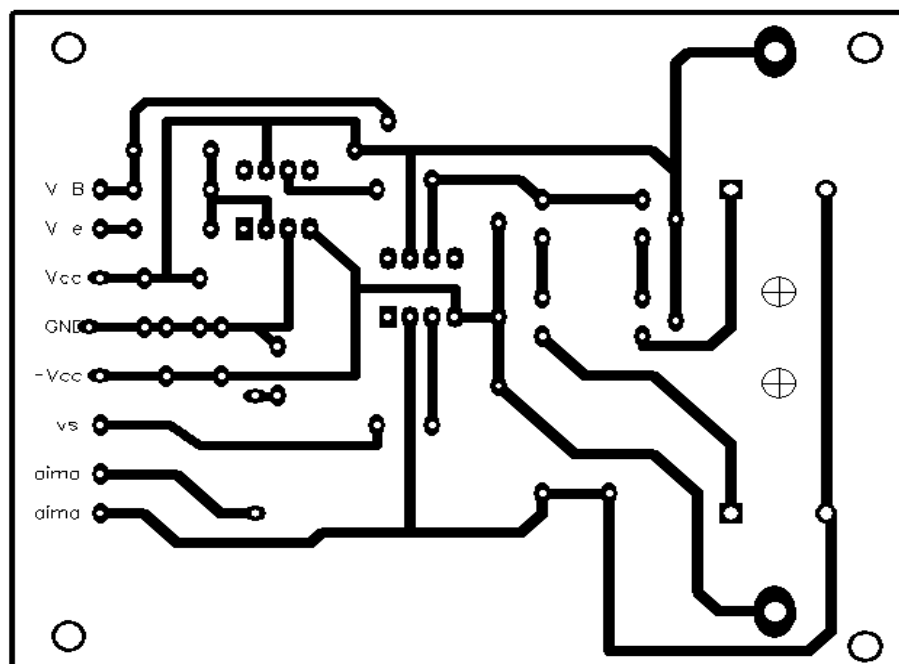
Annexe (3)

Les circuits imprimés

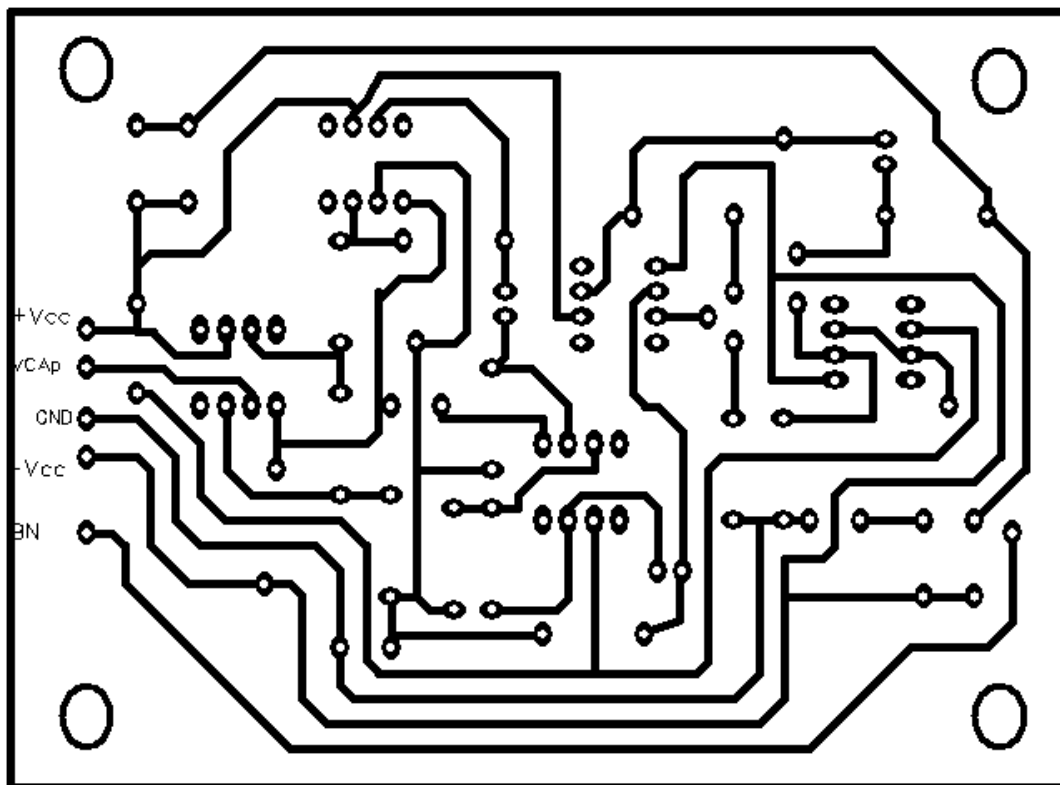
1-le circuit imprimé du générateur de fréquence :



2- le circuit imprimé de l'amplificateur de puissance:



3-le circuit imprimé de la chaîne d'acquisition:



Bibliographie

- [1] BOUFLIGHA MESSAOUD, 'modélisation du mouvement de parois entre domaines magnétique et de l'effet de barkhausen dans les matériaux ferromagnétiques', thèse de magister, université de BEJAIA, Alger, 2003.
- [2] Charles Kittel, 'Physique de l'état solide', Dunod Université, 7e édition Dunod, 1998.
- [3] Zur Theorie des Ferromagnetismus. *ZP* 49, 619--636. Recd. 20 May. Heisenberg. *Z.Für Phys.* N°49, 1228. pp 619. janvier 1956.
- [4] M.Bloch. *Phys.Rev.letters.* N°9, pp286 (1962).
- [5] Chester C.H.LO, 'A review of the Barkhausen effect and its applications to Non-destructive testing', materials evaluation Juillet 2004.
- [6] X. Kleber, Y. Brechet et A. Vincent, 'Application de l'effet Barkhausen et du pouvoir thermoélectrique aux suivis des évolutions microstructurales des évolutions microstructurales des alliages métalliques', revue de métallurgie, CIT/Science et génie des matériaux, Février 2001.
- [7] X. Kleber, Y. Brechet et A. Vincent, 'Simulation numérique des événements Barkhausen application à l'étude de l'influence des obstacles microstructure', *Matériaux et techniques* N0 9-10, 2000.
- [8] M. Haddadi, 'Etude des électroaimants et d'un appareil pour aimantation', thèse PFE, école supérieur de chimie, Alger, janvier 1983
- [9] Moulti Bahia, 'Caractérisation de Certains Traitements Thermiques et Thermochimiques par le Bruit Barkhausen', thèse de magister, U.S.T.H.B – Alger, N° 07/ 2002.
- [10] Mohamed Chafaa Madaoui, Abdelhamid Boumechta, 'Etude et réalisation d'un système de génération et d'acquisition de bruit de Barkhausen utilisé pour l'évaluation

non destructive des matériaux ferromagnétiques, thèse PFE, U.S.T.H.B – Alger.juillet 1992.

[11] Aurélie HUGAMARLIC, 'Etude par mesure du bruit barkhausen de la microstructure et de l'état de contrainte d'acier biphasé : application aux aciers automobile ', mars 2007.

[12] Malloum soultan, 'approches du bruit magnetomécanique, application au suivi de la fatigue en flexion rotative', thèse de doctorat, INSA, université de Lyon. juil. 2004

[13] Amir Nourdine, 'modélisation de l'hystérésis dans les matériaux magnétiques et introduction de modèles dans le logiciel de simulation aux éléments fini flux 3D', thèse Pour obtenir le grade de Docteur DE L'INPG, institut nationale polytechnique de Grenoble, France, Mai 2002.

[14] A.W.M.VAN DEN ENDEN.N.AM VERHOECY, 'traitement numérique du signal', Ed MASSON, PARIS 1992.

[15] André Quinquas, 'Le **traitement** du **signal** sous Matlab'. févr. 2014